

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Материаловедения и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Темных
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный руководитель	_____	_____	<u>В.А. Кукарцев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.Ю. Коптева</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	<u>Ю.М. Мусохранов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Материаловедения и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Темных
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студент Коптева Алена Юрьевна

Группа МТ16-01М Направление (специальность) 22.04.01.04

«Синтез и литье новых металлических материалов»

Тема выпускной квалификационной работы:

«Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана»

Утверждена приказом по университету № 16290/с от 22.11.16

Руководитель ВКР В.А. Кукарцев канд.техн.наук, профессор кафедры МиТОМ

Исходные данные для ВКР:

- разработать технологию производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана с использованием программы моделирования LWMFlowCV;
- изучить свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью и особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения;
- произвести выбор основного необходимого технологического оборудования

Перечень разделов ВКР

1. Характеристика титановых сплавов. Общие сведения
2. Классификация используемых титановых сплавов их применение
3. Литейные свойства сплавов на основе титана
4. Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки сплавов на основе титана
5. Плавка металла и заливка форм
6. Формовочные смеси и связующие материалы
7. Разработка технологии производства отливок из сплава ВТ3-1Л
8. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок
9. Расчёт норм расхода основных материалов

Перечень графического материала:

- чертежи деталей;
- сборочные чертежи;
- блок-схема технологического процесса

Руководитель ВКР

В.А. Кукарцев

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.Ю. Коптева

подпись, инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 20__ г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана» содержит 76 листов, 36 рисунка, 18 таблиц, 23 используемых источников.

Цель работы: разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана с использованием программы моделирования LWMFlowCV.

Задачи:

- изучить свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью;
- изучить особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения;
- освоить использование программ моделирования литейных процессов, способствующих снижению расхода материалов.

В результате проделанной работы был произведен расчет литниково-питающей системы, а также, используя программу LWMFlowCV, проведены изменения, устраняющие дефекты в отливке. Прежде, чем получить удовлетворительный результат, было проведено 6 исследований. Определён выход годного, и исходя из этого, произведен выбор плавильной печи. Также, определен метод изготовления формы, выбрана смесь для изготовления формы, оборудование для сушки, прокатки,

Завершающим этапом данной работы является расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава BT3-1Л.

Выполненная работа соответствует требованиям технического задания.

АННОТАЦИЯ

К настоящему времени в мире разработана и используется достаточно широкая номенклатура титановых сплавов, различающихся по химическому составу, структуре и свойствам. Большое внимание уделяется литейным сплавам. Сфера его применения достаточно обширна – высокопрочные титановые сплавы позволяют создавать принципиально новые конструкции и технологии в различных отраслях машиностроения, авиакосмической и ракетной техники, приборостроения, энергетики, медицины и др.

Важнейшей задачей современного производства полуфабрикатов и изделий из титановых сплавов является снижение его трудоемкости и увеличение коэффициента использования металла. Одним из способов увеличения коэффициента использования металла, является использование программ моделирования литейных процессов при изготовлении литых заготовок.

В данной магистерской диссертации представлена разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана с использованием программы моделирования LWMFlowCV.

В ходе работы были изучены свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью, а так же особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения. Произведен расчет литниковой-питающей системы, который был проверен с использованием программы LWMFlowCV, определен выход годного и, исходя из этого, сделан выбор плавильной печи и технологического оборудования. Произведен расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава ВТЗ-1Л.

Ключевые слова:

ТИТАН, ОТЛИВКА, ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ, КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛИТЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Характеристика титановых сплавов. Общие сведения.....	6
2 Классификация используемых титановых сплавов их применение.....	11
2.1 Деформируемые титановые сплавы.....	11
2.2 Литейные титановые сплавы.....	14
3 Литейные свойства сплавов на основе титана.....	23
4 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки сплавов на основе титана.....	28
5 Плавка металла и заливка форм.....	34
6 Формовочные смеси и связующие материалы.....	43
6.1 Изготовление форм и стержней.....	45
6.2 Сборка форм.....	49
7 Разработка технологии производства отливок из сплава ВТЗ-1Л.....	51
7.1 Характеристика отливки представителя.....	51
7.2 Конструирование литниково-питающей системы с применением программ моделирования	53
8 Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок	66
9 Расчёт норм расхода основных материалов.....	71
Заключение.....	74
Список литературы.....	75

ВВЕДЕНИЕ

Титан и его сплавы нашли применение во многих отраслях промышленности. К настоящему времени в мире разработана и используется достаточно широкая номенклатура титановых сплавов, различающихся по химическому составу, структуре и свойствам. Большое внимание уделяется литейным сплавам. Титан – уникальный по своим свойствам металл. Благодаря удивительным свойствам его называют металлом будущего. Сфера его применения достаточно обширна – высокопрочные титановые сплавы часто относят к так называемым, интеллектуальным материалам, позволяющим создавать принципиально новые конструкции и технологии в различных отраслях машиностроения, авиакосмической и ракетной техники, приборостроения, энергетики, медицины и др.

Важнейшей задачей современного производства полуфабрикатов и изделий из титановых сплавов является снижение его трудоемкости и увеличение коэффициента использования металла. Одним из способов увеличения коэффициента использования металла, является использование программ моделирования литейных процессов при изготовлении литых заготовок.

Цель работы: Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана с использованием программы моделирования LWMFlowCV.

Задачи: Изучить свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью. Особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения. Использование программ моделирования литейных процессов, способствующих снижению расхода материалов, причины, сдерживающие более широкое их применение на производстве.

1 Характеристика титановых сплавов. Общие сведения.

Титан (лат. Titanium) – металл, элемент IV группы периодической системы Д.И. Менделеева. Порядковый номер 22. Атомная масса 47,88. Изотопы: 48 (основной), 46, 47, 49, 50. Плотность 4,5 г/см³. Температура плавления титана 1665+5°С. Температура кипения 3572°С. На рис.1 представлены кристаллы титана. Чистый титан характеризуется невысокой прочностью, высокой пластичностью и технологичностью при обработке давлением, включая холодную штамповку.

Титан отличается высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах (щелочах, кислотах, щелочных и кислотных растворах) и других активных средах. Основные области его применения определяет высокая коррозионная стойкость в естественных средах, в том числе морской атмосфере и морской воде. Титан обладает рядом привлекательных теплофизических свойств, что обуславливает его применение в некоторых специфических областях техники.



Рисунок 1 – Кристаллы титана

Эффективность применения титана во многих средах можно значительно повысить легированием и методами термической обработки. Эти направления во многом определяются его полиморфизмом [1].

Для получения различных сплавов титан легируют Al, Mo, V, Mn, Cr, Sn, Fe, Zr, Nb. Удельная прочность (s_B/r) титановых сплавов выше, чем легированных сталей. На рис. 2 представлена схема деления легирующих элементов и примесей на группы [2].

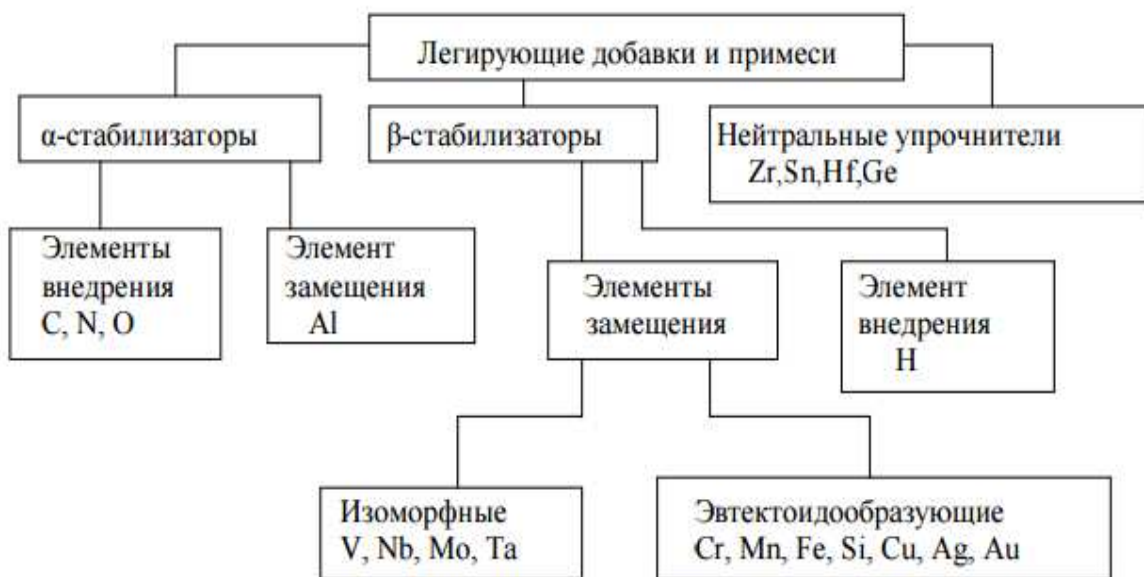


Рисунок 2 - Схема деления легирующих элементов и примесей на группы

Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана подразделяются на три группы:

1. α - стабилизаторы — элементы, повышающие тип титана (Рис.3а). Из металлов к числу α - стабилизаторов относятся Al, Ga, In, из неметаллов — C, N, O.

2. β - стабилизаторы — элементы, понижающие тип титана. Их можно разбить на три подгруппы. В сплавах титана с элементами 1 подгруппы при достаточно низкой температуре происходит эвтектоидный распад β - фазы $\alpha + \gamma$ (Рис. 3б); к их числу относятся Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, называемые эвтектоидообразующими β - стабилизаторами.

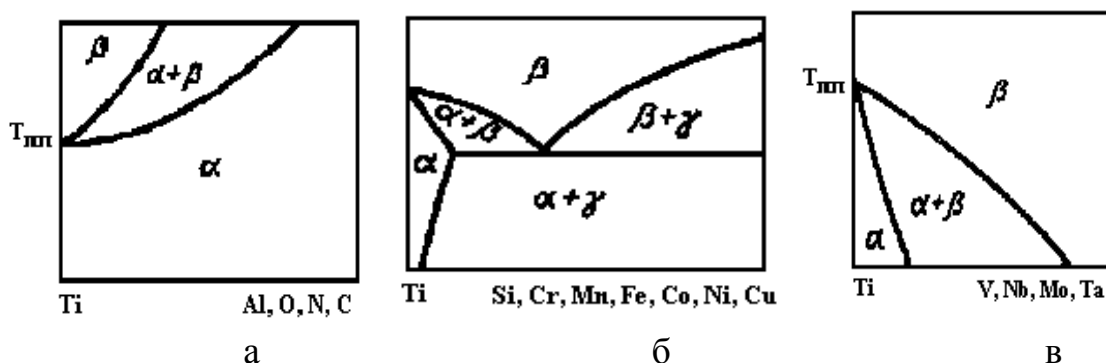


Рисунок 3 — Влияние легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана:

а — α - стабилизаторы — элементы, повышающие тип титана;

б — β - стабилизаторы — элементы, понижающие тип титана;

в — изоморфные β - стабилизаторы.

В сплавах титана с элементами 2 подгруппы β - раствор сохраняется до комнатной температуры (Рис. 3в). К числу этих элементов принадлежат V,

Mo, Nb, Ta. Поскольку они образуют непрерывные твердые растворы с β -титаном, их назвали изоморфными β -стабилизаторами.

В сплавах 3 подгруппы равновесная β -фаза также стабилизируется при комнатной температуре, но непрерывных твердых β -растворов не образуется. К элементам этой подгруппы относятся Re, Ru, Rh, которые в области, богатой титаном, дают с ним такую же диаграмму состояния, как и изоморфные β -стабилизаторы. Их можно назвать квазиизоморфными β -стабилизаторами.

3. Третья группа представлена легирующими элементами, мало влияющими на тип титана. Это олово, цирконий, германий, гафний и торий – их называют нейтральными упрочнителями.

Технический титан и его сплавы получают из титановой губки. Титановая губка, представленная на рис.4 — это пористое серое вещество с насыпной массой 1,5—2,0 г/см³ и очень высокой вязкостью. В зависимости от содержания примесей технический титан подразделяют на несколько сортов: ВТ1-00 (99,53% Ti), ВТ1-0 (99,48 % Ti) и ВТ1-1 (99,44 % Ti) [3].

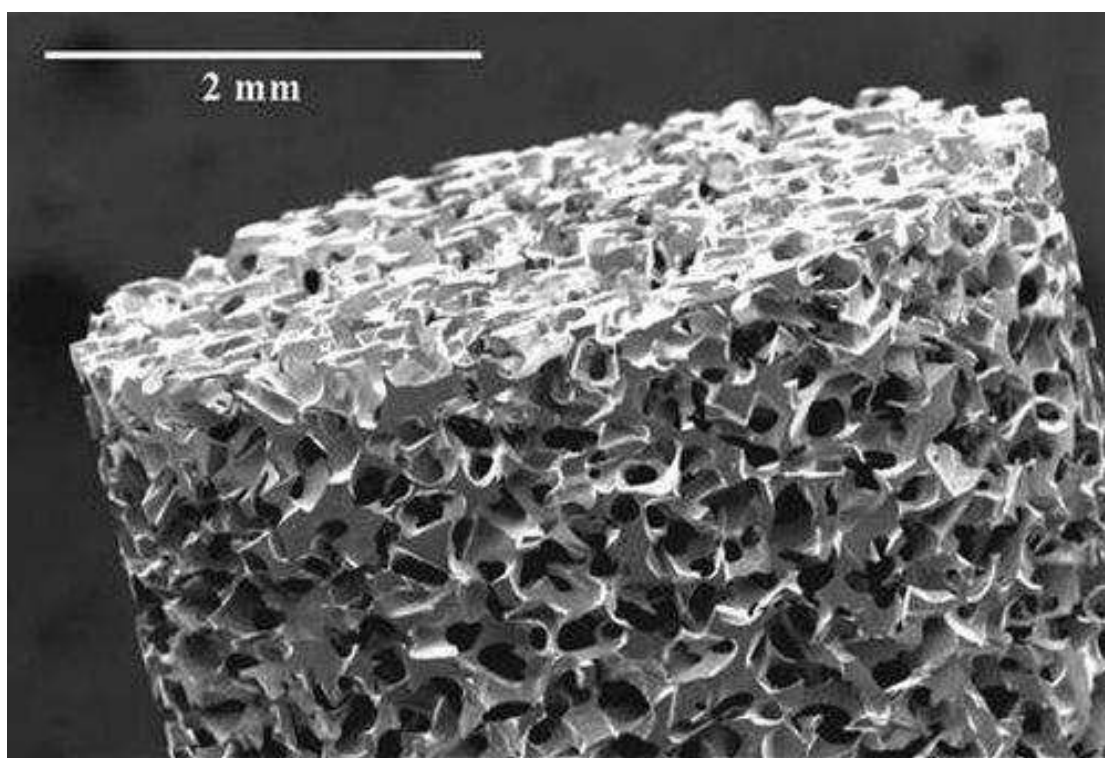


Рисунок 4 – Титановая губка

Общая характеристика титановых сплавов. Практически все титановые сплавы, за редким исключением, легируют алюминием, который имеет следующие преимущества перед остальными легирующими компонентами:

- а) доступность, цена;
- б) плотность алюминия значительно меньше плотности титана, поэтому введение алюминия повышает удельную прочность сплавов;
- в) алюминий эффективно упрочняет α -, ($\alpha+\beta$) - и β -сплавы при сохранении удовлетворительной пластичности;

г) с увеличением содержания алюминия повышается жаропрочность сплавов;

д) алюминий повышает модули упругости;

е) с увеличением содержания алюминия в сплавах уменьшается их склонность к водородной хрупкости.

Однако с увеличением содержания алюминия повышается чувствительность титановых сплавов к солевой коррозии, а также уменьшается их технологическая пластичность. Поэтому если есть опасность контакта сплавов с поваренной солью при работе в интервале температур 250—550°С или необходима высокая технологическая пластичность, содержание алюминия в титановых сплавах следует ограничивать.

Титановые α - сплавы, помимо Al, легируют нейтральными упрочнителями (Sn и Zr). Весьма ценным свойством α - сплавов титана является их хорошая свариваемость; эти сплавы даже при значительном содержании алюминия однофазны, поэтому не возникает охрупчивания шва и околошовной зоны. К недостаткам α - сплавов относится их сравнительно невысокая прочность, сплавы этого класса термически не упрочняются. При содержании более 6% (по массе) Al технологическая пластичность сплавов не велика. С увеличением содержания алюминия повышаются рабочие температуры титановых α - сплавов.

В псевдо - α - сплавы для повышения прочности и жаропрочности при сохранении достаточной технологичности и свариваемости наряду с алюминием следует вводить β - стабилизаторы. Псевдо - α - сплавы при одинаковой с α - сплавами пластичности обладают на 10—20% более высокой прочностью, что обусловлено существенным измельчением зерна при переходе от α - к ($\alpha + \beta$) - структуре. При комнатной температуре псевдо - α - сплавы отличаются более высокой технологической пластичностью по сравнению с α - сплавами.

Псевдо - α - сплавы отличаются высокой термической стабильностью, хорошей свариваемостью. Существенный недостаток псевдо - α - сплавов — их высокая склонность к водородной хрупкости. Большинство α - и псевдо - α - сплавов применяют в отожженном состоянии.

Наиболее благоприятным сочетанием всех свойств отличаются двухфазные сплавы, состоящие из $\alpha + \beta$ - фаз. Эти сплавы характеризуются лучшей технологической пластичностью в отожженном состоянии по сравнению с α - сплавами, высокой прочностью, способностью к термическому упрочнению закалкой и старением, меньшей склонностью к водородной хрупкости по сравнению с α - и псевдо - α - сплавами.

В отличие от α - и псевдо - α - сплавов $\alpha + \beta$ сплавы существенно упрочняются в результате закалки и старения.

Механические свойства отожженных ($\alpha + \beta$) - сплавов существенно зависят от характера микроструктуры. Наибольшие различия наблюдаются для сплавов с зернистой и пластинчатой структурой. Для сплавов с зернистой структурой характерны: высокая циклическая прочность, пластичность, технологичность.

Сплавы с пластинчатой структурой отличаются высокой вязкостью разрушения, ударной вязкостью, жаропрочностью при пониженных характеристиках пластичности и циклической прочности. Высокая вязкость разрушения титановых сплавов с такой структурой обусловлена сильным ветвлением трещин при их распространении.

Псевдо- β -сплавы относятся к высоколегированным титановым сплавам, в которых суммарное содержание легирующих элементов доходит до 20% и более. Хотя при закалке из β -области в этих сплавах фиксируется только β -фаза, она термически нестабильна и при старении распадается с выделением дисперсной α -фазы.

Разработанные, к настоящему времени, псевдо- β -титановые сплавы можно разделить на две группы: а) легированные алюминием, β -стабилизаторами, а в некоторых случаях и нейтральными упрочнителями; б) легированные β -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями.

Титановые β -сплавы с термодинамически устойчивой β -фазой можно получить лишь на основе таких систем, в которых легирующие элементы имеют ОЦК решетку при комнатной температуре и образуют с β -титаном непрерывный ряд твердых растворов. К таким элементам принадлежат ванадий, молибден, ниобий и тантал. Однако стабильные β -фазы в этих сплавах образуются при таких высоких концентрациях компонентов, что титановые сплавы теряют основное их преимущество, а именно сравнительно малую плотность. Поэтому титановые сплавы со стабильной β -фазой не получили широкого промышленного применения [4].

2 Классификация используемых титановых сплавов их применение

Титановые сплавы подразделяются на деформируемые (обрабатываемые давлением) и литейные.

2.1 Деформируемые титановые сплавы.

Большинство титановых сплавов легировано алюминием, повышающим жесткость, прочность, жаропрочность и жаростойкость материала, а также снижающим его плотность (табл. 1).

Титановые сплавы, α – структурой, термической обработкой не упрочняются, их упрочнение достигается посредством легирования твердого раствора и пластической деформацией. Широкое применение нашел сплав ВТ5-1, обладающий хорошей свариваемостью, жаропрочностью, кислотостойкостью, пластичностью при криогенных температурах; он обрабатывается давлением в горячем состоянии, термически стабилен до 450°C.

Таблица 1 – Усредненный химический состав (в %) и механические свойства деформируемых титановых сплавов

Сплав	Al	Mn	V	Mo	Si	Cr	Sn	σ_B МПа	δ , %
ВТ5-1	5	-	-	-	-	-	2,5	800-1000	10-15
ОТ4	4,2	1,4	-	-	-	-	-	700-900	10-12
ВТ6	6	-	4	-	-	-	-	1100-1250	6
ВТ8	6,4	-	-	3,1	0,3	-	-	1000-1250	9-11
ВТ14	4,9	-	1,4	3,1	-	-	-	1150-1400	6-10
ВТ15	3	-	-	8	-	11	-	1300-1500	6

Из сплава ВТ5-1 изготавливают листы, поковки, трубы, проволоку, профили, рис.5. Псевдо- β -сплав ОТ4 (наряду с α – фазой в структуре присутствует β – фаза в количестве 1—5%) хорошо сваривается, обрабатывается давлением (как в горячем, так и в холодном состояниях), однако склонен к водородной хрупкости.



Рисунок 5 – Трубы, выполненные из титанового сплава VT5-1.

Титановые сплавы $(\alpha + \beta)$ - характеризуются смешанной структурой (α - и β - твердые растворы) и упрочняются термической обработкой, состоящей из закалки и старения.

Типичный представитель $(\alpha + \beta)$ - сплавов — это сплав VT6, характеризующийся оптимальным сочетанием технологических и механических свойств. Он упрочняется термической обработкой. Уменьшение содержания алюминия и ванадия в сплаве (модификация VT6C) позволяет его использовать в сварных конструкциях. Сплав VT14 системы Ti—Al—Mo—V обладает высокой технологичностью в закаленном состоянии (хорошо деформируется) и высокой прочностью — в состаренном; он удовлетворительно сваривается всеми видами сварки. Сплав VT14 способен длительно работать при 400 °C и кратковременно при 500 °C.

Сплав VT8 относится к жаропрочным, он предназначен для длительной работы при 450—500°C под нагрузкой. Сплав хорошо деформируется в горячем состоянии, но плохо сваривается. Из него изготавливают поковки, штамповки, прутки.

Широкое распространение получил псевдо- β - сплав VT15 (содержит в равновесном состоянии небольшое количество α - фазы), обладающий большой пластичностью (5-20%) и невысокой прочностью в закаленном состоянии. Однако после старения при 450°C его прочность достигает 1500 МПа (при пластичности 8-6%). Сплав VT15 предназначен для работы при температурах до 350 °C. Из него изготавливают прутки, поковки, полосы, листы [5].

Несмотря на гетерофазность структуры, рассматриваемые сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью всеми видами сварки, применяемыми для титана.

Упомянутые выше деформируемые титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в отожженном и термически упрочненном состояниях во влажной атмосфере, морской воде, во многих других агрессивных средах, как и технический титан [6,7].

Высокопрочные титановые сплавы применяются для изготовления деталей и узлов ответственного назначения: сварные конструкции (ВТ6, ВТ14), турбины (ВТ5-1), штампованные узлы (ВТ14), высоконагруженные детали и штампованные конструкции (ВТ15), для изготовления сопловых лопаток авиадвигателей (ВТИ-2) рис.6. Эти сплавы могут длительно работать при температурах до 400°C и кратковременно до 750°C [8].



Рисунок 6 – Турбинный авиадвигатель ВТИ-6

В строительстве титан используется для наружной обшивки зданий, кровельных материалов, облицовки колонн, софитов, карнизов, навесов, внутренней обшивки, легких крепежных приспособлений. Кроме того, титан используется в скульптуре и для изготовления памятников. Памятник Ю.Гагарину в г. Москва представлен на рисунке 7 [9].



Рисунок 7 - Памятник Ю.Гагарину в г. Москва, изготовленный из титана.

Особенностью высокопрочных титановых сплавов как конструкционного материала является их повышенная чувствительность к концентраторам напряжения. Поэтому при конструировании деталей из этих сплавов необходимо учитывать ряд требований (повышенное качество поверхности, увеличение радиусов перехода от одних сечений к другим и т. п.), аналогичных тем, которые существуют при применении высокопрочных сталей.

2.2 Литейные титановые сплавы.

По сравнению с деформируемыми литейные сплавы имеют меньшую прочность, пластичность и выносливость. Сложность литья титановых сплавов обусловлена активным взаимодействием титана с газами и формовочными материалами. Литейные сплавы ВТ5Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л по составу в основном совпадают с аналогичными деформируемыми сплавами (в то же время сплав ВТ14Л дополнительно содержит железо и хром).

Литейные титановые сплавы маркируются так же, как и деформируемые, но в конце марки ставят букву Л.

В литейных сплавах допускается больше содержание примесей. Механические свойства литейных сплавов ниже, чем деформируемых. Недостатком титановых литейных сплавов является: склонность расплавленного титана к быстрому поглощению газов, содержащихся в атмосфере. В связи с этим, плавка и разливка ведется в вакууме, а формы

изготавливают из графита, корунда или магнезита – материалов, минимально взаимодействующих с расплавленным металлом.

Литейные свойства всех титановых сплавов довольно близки. Для фасонного литья применяют, как правило, сплавы, которые по основным легирующим элементам совпадают с составом деформируемых сплавов. Исключение составляет лишь сплав ВТ21Л. Вместе с тем в них содержание примесей может быть немного больше, поскольку литейные сплавы не нужно деформировать.

В табл. 2 приведен химический состав отечественных литейных сплавов с указанием структурных эквивалентов по алюминию и молибдену. Сплавы типа ВТ расположены в порядке увеличения их эквивалента по молибдену. Поскольку среднее содержание примесей в литейных сплавах больше, чем в деформируемых, «примесный» эквивалент по алюминию был принят равным 2 для титана ВТ1Л и сплава ВТ5Л и 1,5 для остальных сплавов, а не единица, как для деформируемых сплавов [10].

Таблица 2 – Средний химический состав титановых литейных сплавов

Сплав	Легирующие элементы, % по массе						[Mo] _{экв} , % по массе	[Al] _{экв} , % по массе
	Al	Mo	V	Cr	Zr	Прочие		
ВТ1Л	-	-	-	-	-	-	0	2
ВТ5Л	5	-	-	-	-	-	0	7
ВТ21Л	6,5	0,7	1,2	0,3	5,0	-	2,1	8,8
ВТ20Л	6,5	1,3	1,3	-	2,0	-	2,3	8,3
ВТ6Л	6,0	-	4,0	-	-	-	2,9	7,5
ВТ8Л	6,4	3,3	-	-	-	0,30Si	3,3	8,0
ВТ9Л	6,3	3,3	-	-	1,5	0,30Si	3,3	8,0
ВТ14Л	5,3	3,3	1,4	-	-	-	4,3	6,8
ВТ3-1Л	2,5	2,5	-	1,5	-	0,3Si; 0,5Fe	6,0	7,7
ВТ35Л	3	0,6	15	3	0,5	3Sn	16,3	5,6
ТЛ3	3,0-4,5	-	1,5-2,5	-	-	-	0	4,8
ТЛ5	3,5-5,0	-	1,5-2,5	-	-	-	1,4	5,3

Для фасонного титанового литья применяются α – сплавы (ВТ1Л и ВТ5Л), псевдо – α – сплавы (ВТ21Л и ВТ20Л), ($\beta+\alpha$) – сплавы со сравнительно небольшим количеством β – фазы (ВТ6Л, ВТ8Л, ВТ9Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л) и псевдо – β – сплав ВТ35Л. Сплавы ТЛ3 и ТЛ5 – специальные

сплавы «морского» назначения, применяемые в основном в судостроении. Отливки из титанового сплава ВТ1Л и сплава ВТ5Л обычно не подвергают какой-либо термической обработке.

Псевдо α – и $(\beta + \alpha)$ – сплавы отжигают для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений. Отжиг проводят по тем же режимам, которые рекомендованы для деформируемых титановых сплавов [11].

Сплав ВТ35Л имеет однофазную структуру, представленную метастабильной β – фазой, и обладает низкой прочностью. Для упрочнения отливки из сплава ВТ35Л подвергают старению.

Наиболее широко используют α – сплав ВТ5Л, что обусловлено высокими литейными свойствами, простотой технологии получения из него отливок, распространенностью и не дефицитностью единственного в нем легирующего элемента алюминия, удовлетворительной пластичностью и ударной вязкостью отливок, более высокой циклической выносливостью по сравнению с титаном и литейными $(\beta + \alpha)$ – сплавами. Структура сплава ВТ5Л представлена в основном пластинчатыми зернами α – фазы внутри исходного β – зерна.

Сплав не склонен к образованию горячих трещин, хорошо сваривается. Он предназначен для изготовления фасонных отливок, длительно работающих при температурах до 400°C. Его применяют также для создания сложных сварных конструкций с повышенной надёжностью эксплуатации. Отливки из α – сплава ВТ5Л иногда подвергают полному или неполному отжигу для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений.

Сплав ВТ6Л отличается более высокими прочностными характеристиками по сравнению со сплавом ВТ5Л при почти такой же пластичности. Сплав ВТ6Л хорошо сваривается. Его применение обеспечивает создание надежных сварных конструкций в сочетании с деформированными полуфабрикатами из того же сплава. Для снятия остаточных напряжений отливки подвергают отжигу, (лучше, если вакуумному) при 750°C в течение 1-2 ч.

Довольно часто для фасонного литья применяют также сплав ВТ20Л. Отливки из этого сплава по прочности превосходят сплав ВТ5Л. Этот сплав также обладает хорошими литейными свойствами и хорошо сваривается. Специально разработанный литейный сплав ВТ21Л уступает другим сплавам по литейным свойствам и применяется значительно реже, для деталей простых конфигураций.

Общая характеристика литейных сплавов приведена в табл. 3.

Механические свойства литейных титановых сплавов существенно зависят от способа литья: в уплотняемые формы, оболочковые формы, литьё в кокиль, по выплавляемым моделям и т.д. При любом способе литья свойства отливок зависят от их сечения, так как этот фактор влияет на скорость затвердевания и охлаждения отливки и определяет размеры структурных составляющих. Кроме того способ литья влияет на коэффициент использования материала так как предполагает изготовление

отливок определённого класса точности, который предусматривает свои припуски, допуски и т.д.

Таблица 3 – Общая характеристика отечественных литейных титановых сплавов.

Сплав	Общая характеристика	Технологические свойства	Область применения
BT1Л	Низкие прочностные свойства; наиболее высокие показатели пластичности	Хорошие литейные свойства; хорошо сваривается всеми видами сварки	Коррозионностойкая арматура в химическом производстве
BT5Л	Повышенный уровень прочностных свойств, высокие характеристики пластичности и ударной вязкости	Наилучшие характеристики жидкотекучести, что обусловлено малым интервалом кристаллизации сплавов системы Ti-Al (со стороны титана); не склонен к образованию горячих трещин, хорошо сваривается всеми видами сварки	Элементы конструкции самолетов (кронштейны, фитинги, качалки и т.п.); детали газотурбинных двигателей (кронштейны, фланцы, цилиндры, детали сложной формы), ракетно-космическая техника
BT21Л	Высокий уровень прочности, пониженные характеристики пластичности	Из-за легирования Zr, Cr и Mo обладает значительным интервалом кристаллизации и, как следствие, пониженной жидкотекучестью и повышенной склонностью к образованию пористости	Детали простой конфигурации
BT20Л	Легирование Mo, V и Zr обеспечивает более высокие прочностные свойства	Обладает хорошими литейными свойствами,	Элементы конструкции авиационных деталей (кольца, фланцы,

	по сравнению со сплавом ВТ5Л	жидкотекучесть несколько выше, чем у ($\beta + \alpha$)-сплавов. Хорошо сваривается, в том числе с другими сплавами	обоймы, корпуса, детали сложной конфигурации); детали и узлы самолетов; ракетно-космическая техника
ВТ6Л	Легирование Al и V обеспечивает повышенные прочностные свойства при приемлемой пластичности	Обладает хорошими литейными свойствами, хорошо сваривается	Элементы конструкции самолетов и авиационных двигателей
ВТ8Л	Легирование Al, Mo и Si обеспечивает повышенные характеристики жаропрочности при 500-550°C	Обладает удовлетворительными литейными свойствами	Детали, работающие при повышенных температурах
ВТ9Л	Легирование Al, Mo, Zr и Si обеспечивает повышенные характеристики жаропрочности при 500-550°C; пониженная пластичность	Обладает удовлетворительными литейными свойствами; жидкотекучесть хуже, чем у сплава ВТ5Л	Детали, работающие при повышенных температурах
ВТ35Л	Из-за высокого содержания β -стабилизаторов сплав при охлаждении после затвердевания сохраняет метастабильную β -структуру; последующее старение обеспечивает высокую прочность при удовлетворительной пластичности ($\sigma_b \geq 1100$ МПа; $\delta \approx 9\%$; $\psi \approx 7\%$) после газостатирования и	Обладает удовлетворительными литейными свойствами	Высокопрочные литые детали аэрокосмической техники

	старения		
BT14Л	Обладает повышенными прочностными свойствами при удовлетворительной пластичности	Литейные свойства хуже, чем у сплава BT5Л; сплав сваривается	Свариваемые детали аэрокосмической техники
BT3-1Л	Обладает повышенными показателями прочности и жаропрочности при пониженных характеристиках пластичности	Литейные свойства хуже, чем у сплава BT5Л	Детали двигателей, работающие при повышенных температурах
ТЛЗ	Отличается невысокой прочностью, хорошей пластичностью и коррозионной стойкостью в морской воде	Обладает хорошими литейными свойствами; хорошо сваривается	Изделия судового машиностроения
ТЛ5	Более прочный сплав по сравнению с ТЛЗ при меньшей пластичности	Обладает хорошими литейными свойствами; хорошо сваривается	Тяжелонагруженные детали турбогенераторов, гребные винты, сварные конструкции

В настоящее время, титановые отливки широко применяются в самолётостроении, судостроении, космической и химической отраслях промышленности, а также в медицине.

Комплекс механических свойств титановых отливок отличается от свойств, присущих деформированным полуфабрикатам. По некоторым характеристикам, литой материал превосходит деформированный, по другим – уступает ему. Это различие в свойствах определяется в основном более крупным зерном в литых деталях и наличием неразрушенной сетки межкристаллитного вещества, что затрудняет прохождение диффузионных процессов, определяющих эффективность упрочняющей термической обработки. Так, в случае работы при повышенных температурах литой материал будет иметь более высокую жаропрочность и сопротивление ползучести, чем деформированный.

Усталостные характеристики отливок значительно ниже, чем деформированного металла, причем это снижение зависит не только от величины зерна, но и от наличия микроскопической и субмикроскопической пористости, неизбежно присутствующей в фасонных отливках.

Одним из преимуществ титановых отливок являются высокие ударная вязкость и вязкость разрушения, значения которых не уступают, а нередко и превосходят соответствующие величины для деформированного материала.

Титановые отливки широко используются в авиационном и ракетном двигателестроении для деталей типа корпусов и крыльчаток, разного рода кронштейнов, а также большого количества различных мелких арматурных деталей, изготовление которых из прутков механической обработкой трудоёмко (связано с большими потерями металла в стружку), а иногда и вовсе невозможно. Примеры сложных по конфигурации отливок для авиационной промышленности показаны на рис. 8

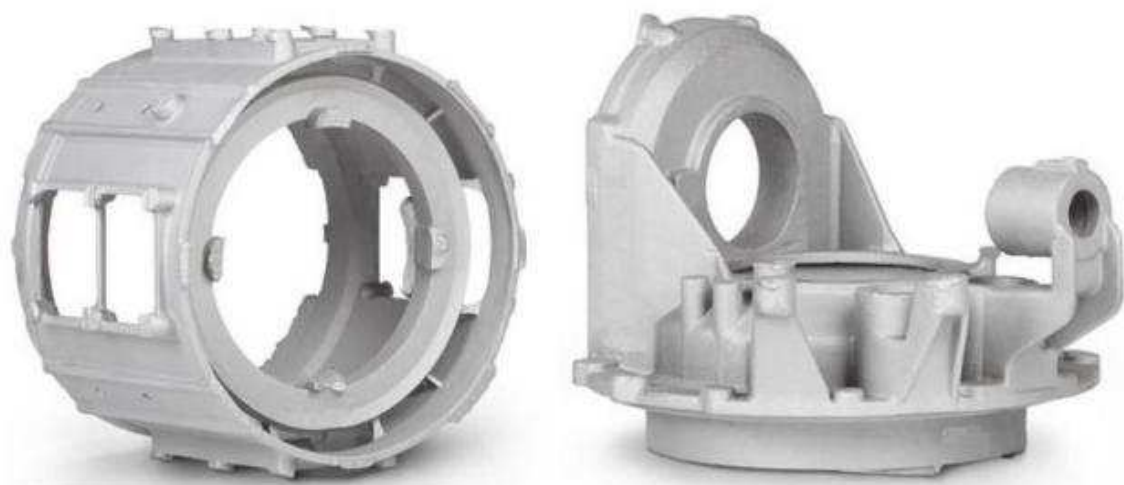


Рисунок 8 – Корпусные отливки авиационной промышленности, выполненные из титанового сплава BT5Л

Наибольшее количество отливок применяют для деталей управления типа кронштейнов и качалок, а также разного рода фитингов, корпусных и арматурных деталей.

Очень выгодным может оказаться применение титановых отливок для крупных деталей шасси тяжелых транспортных самолетов. Предварительные испытания этих ответственных отливок, в условиях эксплуатации дали, обнадеживающие результаты. В данном случае решающим фактором успеха явилось высокое сопротивление отливок ударным нагрузкам. Кроме того, образуется значительная экономия металла и снижение трудоемкости изготовления указанных деталей, нетехнологичных для изготовления методом штамповки.

Отливки из титановых сплавов обладают ещё одним замечательным свойством – очень высокой коррозионной стойкостью в морской воде (гораздо выше, чем, например, у нержавеющей стали). Поэтому, применение титановых отливок в судостроении экономически выгодно (повышенные затраты на изготовление окупаются за счёт очень высокого срока службы деталей). Примеры титановых отливок для судостроения показан на рис. 9.



а



б

Рисунок 9 – Отливки для судостроения, выполненные из титанового сплава ТЛЗ: а – рабочее колесо; б – крыльчатка

Основной номенклатурой титановых отливок для химической промышленности, гидрометаллургии, черной и цветной металлургии и других отраслей машиностроения, имеющих дело с агрессивными технологическими средами и реагентами, является арматура, корпуса и крыльчатки центробежных насосов для перекачки химически активных жидкостей и газов. Пример титановой отливки для химической промышленности показан на рис. 10.



Рисунок 10 – Отливка «корпус насоса» для химической промышленности, выполненная из титанового сплава ВТ1Л

Технико-экономические преимущества применения титановых отливок в этих областях с избытком оправдывают их высокую стоимость. Экономический эффект от применения титановой аппаратуры получается за счет многократного увеличения срока службы.

У титана есть очень ценное свойство – он достаточно легко «вживляется» в организм человека, рис.11. Титановые конструкции (имплантанты, внутрикостные фиксаторы, наружные и внутренние протезы) абсолютно безопасны для костей и мышц. Они не вызывают аллергии, не разрушаются при взаимодействии с жидкостями и тканями организма и, конечно, с медицинскими препаратами. Кроме этого, протезы, изготовленные из титановых сплавов, очень прочны и износостойки, хотя все время выдерживают большие нагрузки.



Рисунок 11 – Титановый протез тазобедренного сустава из сплава Ti-12Mo-6Zr

3 Литейные свойства сплавов на основе титана

Титан и его сплавы обладают хорошими литейными свойствами - высокой жидкотекучестью, малой склонностью к газовой пористости, небольшой линейной и объемной усадкой (2–3 %). В то же время титан имеет высокую химическую активность в расплавленном состоянии, что приводит к его загрязнению примесями, снижающими пластичность и вязкость металла в процессе плавки и при взаимодействии с материалом тигля и формы. Поэтому при фасонном литье возникают проблемы, во-первых, с разработкой способов плавки в защитных атмосферах, во-вторых, с выбором материала для форм и тиглей. В настоящее время первая проблема практически решена за счет использования вакуумной дуговой гарнисажной плавки. Однако материал для форм и тиглей, недорогой и технологичный, до сих пор не найден. Для этих целей наиболее широко используется графит: 80 % всего литья производится по выплавляемым моделям в графитовые и коксовые формы или формы на основе электрокорунда с пироуглеродным покрытием. Такие формы обеспечивают высокое качество поверхности отливок с небольшим газонасыщенным слоем. Другие материалы – рекристаллизованные окиси кальция и тория, карбид титана, также способные выдержать длительный контакт с расплавленным титаном, дороги.

Литьё титановых сплавов в формы, изготавливаемые по выплавляемым моделям, применяют в основном для небольших по весу и сложных по конфигурации тонкостенных отливок. Этот метод позволяет значительно снизить трудоёмкость и стоимость изготовления деталей, поскольку отливки в большинстве случаев не требуют дополнительной механической обработки.

В целом процесс изготовления выплавляемых моделей и оболочковых форм для литья титановых сплавов похож на аналогичный процесс для изготовления стальных отливок. Однако из-за сильной реакционной способности титана при высоких температурах к литейным формам предъявляются особые требования:

- 1) повышенная химическая инертность по отношению к титану.
 - 2) высокая прочность оболочек, так как заливка в большинстве случаев производится центробежным способом.
 - 3) высокая термическая стойкость, поскольку форма заливается в холодном состоянии и должна выдерживать тепловой удар в момент заливки.
- На рис. 12 представлены, отливки, выполненные из титанового сплава по выплавляемым моделям

Для изготовления форм по выплавляемым моделям, предназначенных для титанового литья, используют двуокись циркония, электрокорунд, графит, кокс.



Рисунок 12 - Отливки для судостроения, выполненные из титанового сплава

По жидкотекучести титан находится примерно на уровне углеродистой стали, однако в действительности получать крупногабаритные тонкостенные отливки из титана значительно труднее из-за быстрого остывания и затвердевания металла, что объясняется невысокой энтальпией жидкого титана и трудностью получения высокого перегрева при существующих способах плавки титана.

Титановые сплавы эвтектических составов в отличие от алюминиевых, магниевых и других литейных сплавов не применяются из-за низких физико-химических, технологических свойств титана. Химический состав, механические и физические свойства промышленных литейных титановых сплавов представлены в таблицах 4-6 [12].

Возможность применения фасонных отливок для деталей ответственного назначения определяется их механическими свойствами, которые в свою очередь, зависят от комплекса литейных свойств выбранного сплава, связанных с температурным интервалом кристаллизации.

Таблица 4 - Химический состав и гарантируемые механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Средний химический состав сплава, мас. %	Механические свойства, не менее				
		$\sigma_{B,}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta,$ %	$\psi,$ %	$a_n,$ МДж / м ²
BT1Л	Технический титан	343	294	10	20	0,49
ТЛ-3	Ti-4,5Al	588	539	8	16	0,4
BT5Л	Ti-5,2Al	686	627	6	14	0,3
BT20Л	Ti-5,5Al-2Zr-1Mo-1V	932	823	5	13	0,25
BT21Л	Ti-6Al-5Zr-1V-0,7Mo-0,35Cr-0,2W	981	902	4	8	0,2
BT6Л	Ti-6Al-4V	882	804	5	12	0,25
BT3-1Л	Ti-6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,2Si-0,5Fe	932	814	4	8	0,25
BT9Л	Ti-6Al-3,3Mo-1,5Zr-0,3Si	932	855	4	8	0,2
BT14Л	Ti-5Al-3,5Mo-1,5V-0,3Cr-0,4Fe	883	785	5	12	0,25
BT23Л	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,7Fe	990	880	4	8	0,25
BT18УЛ	Ti-6,5Al-4Zr-3Sn-1Nb-0,7Mo-0,2Si	905	821	12	24	0,3
BT35Л	Ti-3Al-15V-3Cr-3Sn-1,2Zr-1Mo	1110	980	6	16	0,25
ВТЛ1	Ti-5Al-1Si	835	736	5	12	0,15

Таблица 5 - Предельное содержание примесей в литейных титановых сплавах

Марка сплава	C	O ₂	N ₂	H ₂	Fe	Si	Zr	W
	мас. % не более							
BT5Л	0,20	0,20	0,05	0,015	0,35	0,20	0,80	0,20
ТЛ-3	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	-	-
BT20Л	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	-	-
BT21Л	0,20	0,20	0,05	0,015	0,35	0,20	0,80	0,20
BT6Л	0,10	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	0,30	0,20
BT3-1Л	0,15	0,18	0,05	0,015	-	-	0,50	0,20
BT9Л	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	-	-	0,20
BT14Л	0,12	0,15	0,05	0,015	0,60	0,15	0,30	0,20
BT1Л	0,20	0,20	0,05	0,015	0,35	0,20	0,80	0,20
BT23Л	0,20	0,20	0,05	0,015	-	0,20	0,80	0,20
BT18УЛ	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	-	-
BT35Л	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	-	-
ВТЛ1	0,20	0,20	0,05	0,015	0,35	-	0,80	0,20
Примечание. Сумма прочих примесей – не более 0,3%								

Таблица 6 – Физические свойства титана и его литейных сплавов

Сплав	Плотность при 20°C кг/м ³	Температура, °C		$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$c,$ кДж/(кг, К)	$\lambda,$ Вт/(м, К)	$\rho_{20} \cdot 10^6,$ Ом*см
		ликвидус	солидус				
Титан	4500	1668	-	11,2 (0-1668)	0,525 (20) 0,591 (500) 0,691 (1000) 0,698 (1500)	13,4 (20) 16,3 (500) 21,0 (1000) 26,8 (1500)	61
BT5Л	4410	1640	1600	8,6 (20-100) 9,2 (20-500) 9,8 (20-900)	0,544 (100) 0,670 (400) 0,754 (600)	8,79 (25) 13,0 (400) 15,5 (600)	
BT6Л	4430	1650	1590	8,3 (20-100) 9,5 (20-500) 10,0 (20-700)	0,543 (100) 0,668 (400) 0,794 (700)	8,8 (25) 13,4 (400) 17,6 (700)	162
BT3-1Л	4430	1620	1560	9,5 (20-100) 10,3 (20-500)	0,565 (100) 0,691 (400) 0,795 (600)	6,69 (25) 12,1 (400) 15,1 (600)	
BT9Л	4490	1620	1560	7,61 (20-100) 9,57 (20-500) 10,49 (20-800)			169
BT14Л	4500	1650	1590	7,82 (20-100) 8,73 (20-500) 8,84 (20-700)	0,501 (100) 0,623 (400) 0,993 (800)	9,1 (100) 13,1 (400) 18,2 (800)	161
BT21Л	4470	1630	1550	8,5 (20-100) 9,5 (20-500) 10,5 (20-900)	0,515 (100) 0,675 (400) 0,900 (800)	7,9 (100) 12,1 (400) 18,4 (800)	170
BT1Л	4500	1670	1655	8,2 (20-100)	0,525 (920)	13,4 (20)	106

Двойные сплавы с изоморфными β -стабилизаторами — ванадием, ниобием, танталом и молибденом также имеют сравнительно небольшой температурный интервал затвердевания. Поэтому сплав BT6 — один из наиболее распространенных деформируемых титановых сплавов является хорошим литейным сплавом.

Более широкий температурный интервал кристаллизации имеют двойные титановые сплавы с эвтектоидообразующими элементами — кремнием, железом, марганцем, медью, но поскольку эти компоненты входят в промышленные сплавы в небольших количествах (0,2-2%), их отрицательное влияние на литейные свойства невелико (см. табл. 6).

Отличительная особенность литейных титановых сплавов — отсутствие в них эвтектики. Она образуется лишь при высоких концентрациях второго элемента, значительно превосходящих максимальные пределы легирования промышленных титановых сплавов. Структура промышленных титановых сплавов обычно состоит из смеси двух твердых растворов на основе α - и β -фаз, иногда с небольшим количеством интерметаллидных фаз.

Максимальная эвтектическая концентрация наблюдается в системе Ti-Si и соответствует 8,5%Si, в то время как максимальное содержание этого элемента в промышленных сплавах не превышает 0,3%. В двойных сплавах титана с другими элементами эвтектические концентрации еще выше. Так, в системе Ti-Mn эвтектическая концентрация составляет 42,5%, а предельная

концентрация этого элемента в промышленных титановых сплавах обычно не более 2% (за исключением устаревших сплавов).

Наиболее технологичными и распространенными литейными титановыми сплавами являются α - и псевдо α - сплавы, которые аналогично деформируемым сплавам той же группы характеризуются хорошей свариваемостью и малочувствительны к упрочняющей термической обработке. Это такие сплавы как ВТ18, ВТ20, ОТ4. Такое совпадение объясняется сходством термических циклов сварки плавлением и охлаждения отливки в форме. В обоих случаях затвердевающий металл (а в случае сварки и зона термического влияния) проходит широкую полосу различных режимов охлаждения, вызывающих охрупчивание, если сплав чувствителен к закалке и старению. Кроме того, термически упрочняемые сплавы двухфазного типа содержат повышенное количество добавок β -стабилизаторов, расширяющих температурный интервал кристаллизации и, следовательно, ухудшающих литейные свойства [13].

Основной целью легирования титановых сплавов является повышение прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Широкое применение нашли сплавы титана с алюминием, хромом, молибденом, ванадием, марганцем, оловом и некоторыми другими элементами.

Такие элементы, как Al, N, O, повышают температуру полиморфного превращения, расширяя область твердых растворов на основе α -титана и таким образом являются α -стабилизаторами. Учитывая охрупчивающее действие азота и кислорода, практическое значение для легирования титана имеет только алюминий. Алюминий является основным упрочняющим легирующим элементом, к тому же имеющим малую плотность. Поэтому он обычно присутствует в большинстве титановых сплавов.

Большинство легирующих элементов (Mo, V, Mn, Fe, Cr и др.), наоборот, понижают температуру полиморфного превращения и расширяют область существования твердых растворов на основе α -титана, являясь β -стабилизаторами.

Некоторые стабилизаторы (Cr, Mn, Fe, Ni и др.) могут образовывать с титаном интерметаллические соединения типа TiX . Упрочняющая термическая обработка, состоящая из закалки и старения, применима только для сплавов с ($\alpha + \beta$)-структурой. Сплавы с устойчивой α -структурой нельзя упрочнить термической обработкой.

Нейтральные элементы Sn, Zr, Hf, Th не оказывают существенного влияния на температуру полиморфного превращения и не меняют фазового состава титановых сплавов.

4 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки сплавов на основе титана

Титан и его сплавы в жидком состоянии обладают очень высокой реакционной активностью (все известные огнеупорные материалы не выдерживают влияния расплавленного титана). К тому же титан очень чувствителен к воздействию примесей (азот, водород, кислород, углерод), которые могут оказаться в расплаве при его контакте с футеровкой печи.

Эти обстоятельства предъявляют ряд требований к плавильным агрегатам для плавки титановых сплавов:

- использование источников тепла, обеспечивающих высокую температуру расплавляемого металла путем подвода непосредственно к нему тепловых потоков большой плотности и не вносящих в атмосферу печи или непосредственно в расплав посторонних элементов;
- создание в печи вакуума или защитной атмосферы на этапах нагрева, плавления, заливки металла в литейную форму, затвердевания и охлаждения отливки;
- отсутствие контакта жидкого металла с элементами конструкции печи за счёт применения гарнисажа – слоя твёрдого титана (того же химического состава, что и расплав) на внутренней поверхности тигля.

Гарнисаж должен оставаться твёрдым (не должен расплавляться) в течение всего периода плавки и защищать тигель от контакта с расплавом. Все существующие разнообразные конструкции печей для плавки стали, чугуна, медных, алюминиевых, магниевых и других сплавов не удовлетворяют перечисленным требованиям. Поэтому для плавки титановых сплавов были разработаны специальные конструкции печей.

В настоящее время наибольшее распространение получили дуговые вакуумные гарнисажные печи. В таких печах в качестве источника тепла используется электрическая дуга прямого действия, горящая между расходуемым электродом и расплавляемым в тигле металлом, а затем между электродом и зеркалом жидкого металла.

Расходуемый электрод изготавливается из сплава, из которого потом будет изготовлена отливка. Поэтому загрязнение жидкого металла посторонними примесями, которые могли бы содержаться в шихте, практически исключается.

На рис. 13 представлена схема дуговой гарнисажной плавки с расходуемым электродом.

В гарнисажной печи расплавленный титан находится в контакте со слоем твердого титана толщиной 5—50 мм, называемым гарнисажем и постоянно поддерживаемым на стенках и дне водоохлаждаемого тигля. При плавке исключается взаимодействие расплава с атмосферой и материалом тигля, что повышает однородность металла и предупреждает появление в отливке тугоплавких включений.

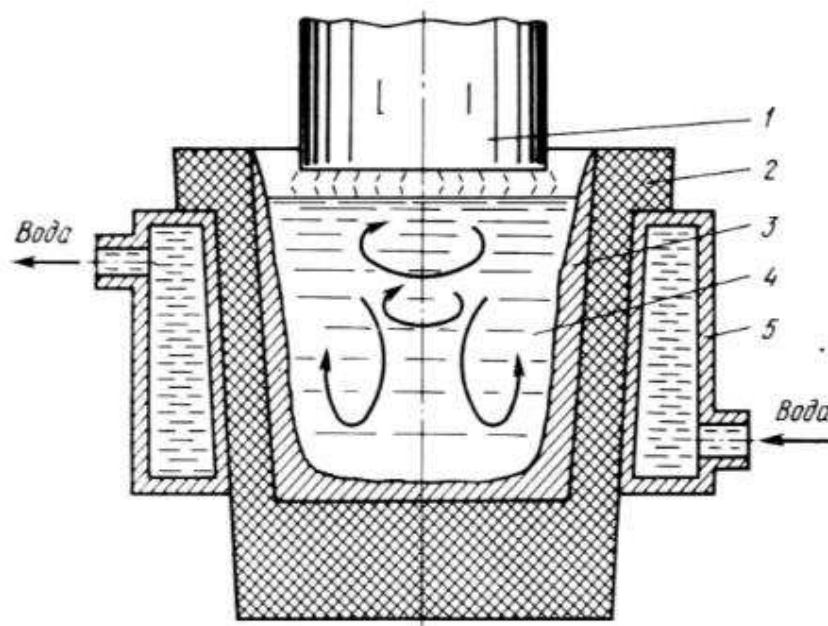


Рисунок 13 - Схема дуговой гарнисажной плавки с расходуемым электродом:
 1 – расходуемый электрод (катод); 2 – тигель; 3 – гарнисаж; 4 – ванна жидкого металла (анод); 5 – система водяного охлаждения тигля

4.1 Изготовление расходуемых электродов.

Расходуемые электроды получают прессованием губки на прессах или путем спекания в электрической дуговой печи. Конструкции печей для плавки титана с расходуемым электродом могут быть двух типов: первый тип — когда электрод изготавливается наплавлением металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе с опускающимся слитком; второй тип — когда электрод получается путем наплавления металла в неподвижную изложницу при непрерывно поднимаемом уровне ванны.

Процесс получения слитков ведется путем двойной плавки — первая плавка для получения расходуемого электрода ведется с нерасходуемым графитовым электродом, вторая — с расходуемым. В качестве расходуемого электрода служит титановый слиток, полученный при первой плавке. Первоначальный процесс плавки ведется следующим образом: на поддон изложницы устанавливаются отходы (темплеты, обрезки слитков и т. п.). В печи создают вакуум до 50 мм рт. ст. и после проверки герметичности начинается плавка. Зажигание дуги происходит при опускании электрододержателя с электродом к установленному на поддоне титану. После того как дуга зажжена и отрегулирована ее длина, из бункера подается шихта. В процессе плавки поддерживается постоянная ванна жидкого металла при длине дуги 150—200 мм. Отлитый слиток переплавляется в такой же печи, но уже как расходуемый электрод, устанавливаемый вместо графитового. Расходуемый титановый электрод приваривается к титановому наконечнику электрододержателя.

Существует два способа изготовления прессованных титановых электродов из губки: прессованием в глухой матрице или брикетированием и непрерывным прессованием.

Лучшие электроды получаются методом брикетирования при расположении оси электрода горизонтально, т. е. перпендикулярно приложенному усилию. Удельное давление при брикетировании должно составлять не менее $1\text{--}1,5 \text{ т/см}^2$ площади сечения электрода. Плотность получаемых электродов составляет $3,8\text{--}4 \text{ г/см}^3$. Однако этот метод имеет ограниченное применение, так как при производстве крупных слитков весом свыше 500 кг требуются вертикальные прессы очень большой мощности. Прессование по длинной оси брикета дает брикеты неравномерной плотности по высоте. Применяется второй метод — так называемое непрерывное прессование на вертикальном прессе. Изготовление брикетов этим методом ведется непрерывно и можно получать электрод любой длины.

На рис. 14 показана схема непрерывного прессования электрода. Так как усилие прессы при этом методе направлено по оси электрода, это позволяет создавать очень большие удельные давления — до $10\text{--}12 \text{ т/см}^2$, и обеспечивает возможность осуществления непрерывного процесса прессования. Процесс ведется следующим образом: в матрицу, имеющую на дне конусный выход с углом конусности 2° и длиной цилиндрической части, равной 50 мм, засыпается губка. Последняя спрессовывается при закрытой матрице, после этого пробка, закрывающая отверстие, удаляется и при дальнейшей добавке губки и прессовании электрод выходит в нижнюю часть матрицы, процесс может продолжаться непрерывно для получения электрода требуемой длины.

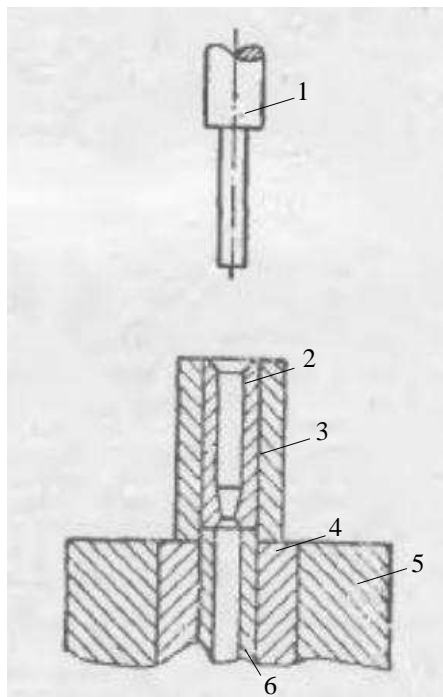


Рисунок 14 – Схема непрерывного прессования электрода: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – корпус матрицы; 4 – обойма; 5 – корпус; 6 – направляющая.

Для такого прессования необходимы прессы мощностью до 3500 т, позволяющие получать электроды диаметром до 300 мм с удельным весом 3,3—3,4. Прессование можно вести как на вертикальном, так и на горизонтальном прессе.

При дуговой плавке освоено использование отходов титанового производства (стружки, обрезков и т. д.). Обрезки превращаются в расходные электроды путем прессования или переплавкой. Окисленные отходы обрабатывают водным раствором HCl и NaF . Количество подшихтовываемых к губке отходов определяется качеством требуемого металла и составом исходной губки.

Качество слитков дуговой плавки зависит от режима технологического процесса. Применяемое в настоящее время двукратное плавление улучшает качество, однако процесс дуговой плавки не всегда дает однородную структуру слитка

Конструкции дуговых вакуумных печей позволяют проводить плавку в атмосфере инертного газа, однако, плавку титановых сплавов обычно проводят в вакууме (разряжение 0,13—1,3 Па), поскольку при этом осуществляется не только защита титана от попадания в него примесей из окружающей среды, но происходит и дегазация металла.

В зависимости от способа разливки металла дуговые вакуумные гарнисажные печи подразделяются:

- печи с разливкой металла при выключенной дуге;
- печи с разливкой металла из-под горячей дуги;
- печи с разливкой металла через затопляемое отверстие

В зависимости от степени механизации печи могут быть: периодического действия (одновременно для заливки металла в печь загружается только одна форма), полунепрерывного действия (за цикл работы печи заливается несколько форм) непрерывного действия.

Отличительной особенностью вакуумной плавки является испарение практически всех элементов, интенсивность которого определяется природой материала, глубиной вакуума. Иногда испарение позволяет очистить переплавляемый материал от вредных примесей.

Например, при плавке титана исходным продуктом является так называемая титановая губка, получившая название вследствие того, что внешним видом она напоминает обычную губку.

Весьма перспективным является метод плавки титана при помощи электронного луча. Жидкая ванна создается электронным лучом достаточно высокой мощности. Этим методом получают металл высокого качества, поскольку из титана эффективно удаляются газы, такие, как кислород, водород, азот. Однако имеется еще ряд нерешенных вопросов, которые затрудняют широкое применение указанного метода. Ведутся исследования по совершенствованию гарнисажной плавки титана (замене водяного охлаждения тигля другими хладагентами), а также по изысканию средств и методов для вторичного охлаждения слитков в процессе литья.

При эксплуатации вакуумно-дуговых печей существенным является обеспечение безопасности персонала, особенно при плавке титана. Кроме мер пассивной защиты (помещение печи в стальной, железобетонный бокс и применение дистанционного наблюдения за дугой) большую роль играет также система автоматического регулирования режима печи в части устройства для автоматического подавления ионизации и боковой дуги, а также автоматическая система отключения печи и водоохлаждения в случае падения давления в линии подачи воды.

Плавка в гарнисажной печи имеет свои особенности: во избежание аварии толщина донного гарнисажа должна быть не менее 100 мм, бокового 50 мм [15].

Отечественные заводы электротермического оборудования освоили серию печей ВДП. Эта серия включает печи типов: ДСВ — для плавки стали; ДТВ — для плавки титана; ДДВ — для плавки молибдена и других тугоплавких металлов; ДНВ — для плавки ниобия.

Условные обозначения для этих типов печей, например, типа ДТВ-14-Г26, означают: Д — дуговая, Т — для плавки титана, В — вакуумная, 14 — диаметр кристаллизатора 1400 мм, Г — с глухим кристаллизатором, 26 — максимальная масса слитка 26 т; ДДВ-2,5В-0,6: Д — дуговая, Д — для плавки тугоплавких металлов, В — вакуумная, 2,5 — диаметр кристаллизатора 250 мм, В — вытягивание слитка, 0,6 — максимальная масса слитка 0,6 т [16].

Далее в таблице 7 приведены основные технические характеристики наиболее распространенных в промышленности вакуумно-дуговых печей.

Таблица 7 - Основные технические характеристики распространенных в промышленности вакуумно-дуговых гарнисажных печей.

Показатель	Марка печи											
	ВДЛП 626-1	«Нева- 2»	«Нева- 4»	ДТВГ – 0,06ПЦ (ОКБ – 956)	ДТВГ – 0,16 (ОКБ – 935)	ДТВГ – 0,25 (ОКБ – 1007)	ДТВГ – 0,6ПЦ	ДВП - 15	ВДП - 3	ВДЛ - 250	УВД - 5	«Альфа»
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Емкость печи по сливаемому титану, кг	80	150	500	60	160	250	600	15	100	250	5	10
Сила тока дуги, кА	6	12,5	25	12,5	12,5	25	25	5	12,5	25	4	12,5
Напряжение источника пи- тания, В	60	65	75	75	75	75	75	60	-	-	60	65
Рекомендуемые источники питания	Полупроводниковые выпрямительные агрегаты											
Вакуум, Па	2,33	0,133	1,33	1,33	0,130	1,33	0,133	1,33	0,130	1,33	0,133	0,0133
Размеры элек- трода, мм:												
Длина	500	800	100	600	500	485	1000	500	800	1000	500	500
диаметр	260	280	410	170	280	460	460	120	280	350	100	100

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Размеры заливаемых форм, мм:												
длина (диаметр)	800	100	1600	800	1000	1500	400	1000	1500	300	500	
ширина	-	-	-	-	600	800	-	-	-	-	-	-
Высота	800	1000	1200	500	500	1200	1500	350	1000	1500	300	350
Количество форм, шт.	1	1	1	1	5	4	1	1	1	2	1	1
Частота вращения форм, об./мин	0-600	60-600	0-300	150-800	-	-	0-300	0-600	0-600	0-300	0-800	0-800
Длительность цикла, ч	2	3	4	2	5,5	7	5	1	3	4	0,5	1
Расход охлаждающей воды, м³/ч	6	10	25	25	38	45	54	6	25	25	5	5
Габаритные размеры печи, мм:												
Длина	5000	5000	7000	7400	10080	11350	-	2500	3000	2400	1000	1500
Ширина	2500	3500	5000	2800	5775	6750	-	15000	3800	24000	1000	1500
Высота	3000	3200	4000	5275	5845	5175	-	2300	6000	12000	2000	3500
Масса, т	5	8	15	17,6	35,2	42	-	2,8	10	55	15	2

Печи типов ДТВ, ДДВ и ДНВ снабжаются взрывными камерами. По современным представлениям при прожоге кристаллизатора в результате переброса дуги на его стенку охлаждающая кристаллизатор вода попадает на расплавленный металл. При этом вода либо с большой скоростью испаряется, что происходит при плавке стали, либо еще частично разлагается на кислород и водород, что происходит при плавке титана и других высокореакционных металлов.

В расходующие электроды при прессовании губки можно вводить легирующие элементы, необходимые для образования сплава. В качестве не расходующих электродов пользуются пустотелыми медными, охлаждаемыми водой электродами, конец которых изготовлен из вольфрама. Этот тугоплавкий металл не плавится в зоне дуги, но все же частично вольфрам попадает в титан, изменяя его свойства. Плавку ведут на водоохлаждаемом пустотелом медном поддоне с титановой настелью. Медь здесь не взаимодействует с титаном. Жидкий титан, попадающий на поддон, затвердевает. Дальнейшая плавка титана ведется на этой настели. Поэтому металл получается чистым. Для легирования титана наряду с введением легирующих добавок в расходующие электроды в жидкий металл присаживают так называемые лигатуры, представляющие собой сплавы титана с легирующими элементами.

Тигли гарнисажных печей изготавливают из металла или графита. Металлические тигли (из меди или нержавеющей стали) снабжают мощным охлаждением. Графитовые тигли помещают в обойму из нержавеющей стали, охлаждаемую водой.

5 Плавка металла и заливка форм

Подготовка шихты. В качестве шихты для плавки в дуговых вакуумных гарнисажных печах используются расходуемые электроды (например, марок ЭТЗ, ЭТ5, ВТ1-00 и др.), получаемые переплавкой прессованных из губки брикетов или штабиков в обычных дуговых вакуумных печах, а также очищенных литейных отходов.

Химический состав электродов должен соответствовать химическому составу изготавливаемой отливки. В отечественных дуговых гарнисажных печах применяются расходуемые электроды диаметрами 280, 350, 420, 470 и 520 мм. Наилучшее соотношение диаметра электрода к диаметру тигля составляет 0,5 (например, для тигля с внутренним диаметром 460 мм нужен расходуемый электрод диаметром 280 мм). Такое соотношение обеспечивает сохранность гарнисажа и получение качественного металла (если диаметр электрода будет слишком большим, то увеличивается риск переброса дуги на стенку тигля, если слишком малым, то трудно будет обеспечить необходимый перегрев расплава).

Поверхность электродов должна быть тщательно очищена от возгонов и других загрязнений (масла и т.п.). К тому же поверхностный слой электродов, как правило, сильно насыщен газами, которые при дальнейшем переплаве могут попасть в металл отливки. По этой причине часто электроды поставляют в виде обточенных цилиндрических заготовок. Литейные отходы представляют собой кусковую шихту (литники, прибыли, центральные стояки и т.д.). Доля отходов в балансе металла при производстве отливок может достигать 80 %, что значительно сокращает стоимость литья.

Наибольшую долю (около 75 – 80%) в общем балансе литейных отходов цеха составляют центральные стояки, литники и прибыли. Брак отливок составляет 3 – 5%. К литейным отходам также относятся настывшие в металлоприёмниках и заливочных лотках, а также гарнисаж вышедших из строя тиглей (их суммарное количество составляет 13 – 15%). Стружка после первичной механической обработки отливок составляет около 2%.

Все литейные отходы титановых сплавов по степени загрязнённости классифицируют на сортовые и несортовые.

Сортовые отходы подразделяют на отходы первого и второго сорта. К отходам первого сорта относятся элементы литниковых систем и прибылей, настывшие в металлоприёмниках и заливочных лотках, бракованные по геометрии и рентгеноконтролю (но не по химическому составу) отливки.

Ко второму сорту относятся отливки, забракованные по химическому составу, и отходы, образовавшиеся при их производстве.

Несортовыми отходами считают скрап в печи, использованные гарнисажи, стружку от черновой механической обработки отливок, а также мелкокусковые отходы, перепутанные по маркам сплавов.

Регенерация несортовых отходов очень трудоёмка и длительна, поэтому при производстве фасонных отливок экономически выгодно использовать только сортовые отходы.

У сортовых отходов загрязнён посторонними примесями (азот, углерод, кислород, водород) в основном тонкий поверхностный слой глубиной приблизительно 0,5 – 0,8 мм. При резке и измельчении отходов происходит дополнительное загрязнение металла в местах реза. Например, в зоне ацетиленокислородного реза образуются различного вида соединения титана с кислородом, азотом, углеродом и водородом. Толщина газонасыщенного слоя при оптимальном режиме резки составляет около 0,1 – 0,15 мм.

При анодно-механической резке поверхность металла насыщается продуктами взаимодействия расплавленного металла с атмосферными газами на глубину до 0,2 мм и более.

С целью удаления остатков материала литейной формы с поверхности сортовых отходов, а также удаления поверхностного загрязнённого слоя применяют механическую и химическую очистку.

Перед очисткой отходы измельчают до размеров, обеспечивающих их компактную укладку при переплаве.

Механическую очистку производят в галтовочных и дробемётных барабанах, в дробемётных и дробеструйных камерах. Дробеструйная или дробемётная обработка очищает литую поверхность титановых отходов более эффективно, чем галтовка. Продолжительность очистки отходов на глубину около 0,1 мм в галтовочных барабанах составляет от 8 до 10 ч.

Продолжительность такой же очистки в дробемётных барабанах и в дробеструйных камерах составляет 1 – 1,5 ч. Галтовкой, дробемётной и дробеструйной обработкой практически не очищаются закрытые и труднодоступные поверхности. Поэтому такие участки отходов удаляются резкой или зачищаются на наждачных кругах.

После механической очистки производят обработку окисленных поверхностных слоёв отходов растворами NaOH (600 – 650 г/л); NaNO₃ (200 – 250 г/л) и NaNO₂ (50 – 60 г/л) или NaOH (500 – 700 г/л) и NaNO₂ (150 – 250 г/л). Температура раствора ≈ 140 °С, время обработки от 30 мин до 2 ч.

Затем отходы промывают в тёплой и холодной воде и травят в кислотном растворе следующего состава: S₄OH₂ (60 – 70 мл/л; плотность 1,84 г/см³) и HF (60 – 140 мл/л; плотность 1,13 г/см³). Температура раствора ≈ 20 °С. Скорость травления составляет 0,2 – 0,5 мм/ч. Очищенные отходы промывают в холодной воде и сушат при 110 – 150 °С.

Химическим травлением с поверхности титановых отходов удаляется налёт железа и абразива. Отходы после травления приобретают характерный серебристый цвет. Отходы в шихту могут вводиться либо загрузкой непосредственно в тигель перед плавкой, либо в виде заранее изготовленного электрода. Расходуемые электроды из одних отходов изготавливают сваркой в среде инертного газа, укладывая куски таким образом, чтобы полученный электрод имел в поперечном сечении более или менее правильную геометрическую форму. Сварные швы выполняют достаточно большого сечения во избежание разрушения электрода в процессе плавки.

Схема дуговой вакуумной гарнисажной печи «Нева-4» представлена рисунке 15. Перед каждой новой плавкой подготовку печи производят в следующем порядке: проверяется исправность всех механизмов и систем печи (вакуумной системы, выпрямительного агрегата, центробежной машины и т.п.), производится очистка внутренних элементов печи от пыли и конденсатов с помощью пылесоса. Узел тигля, траверсу, державку, все резиновые уплотнения через каждые 10 плавков необходимо протирать бязью, смоченной в спирте или авиационном бензине Б-70.

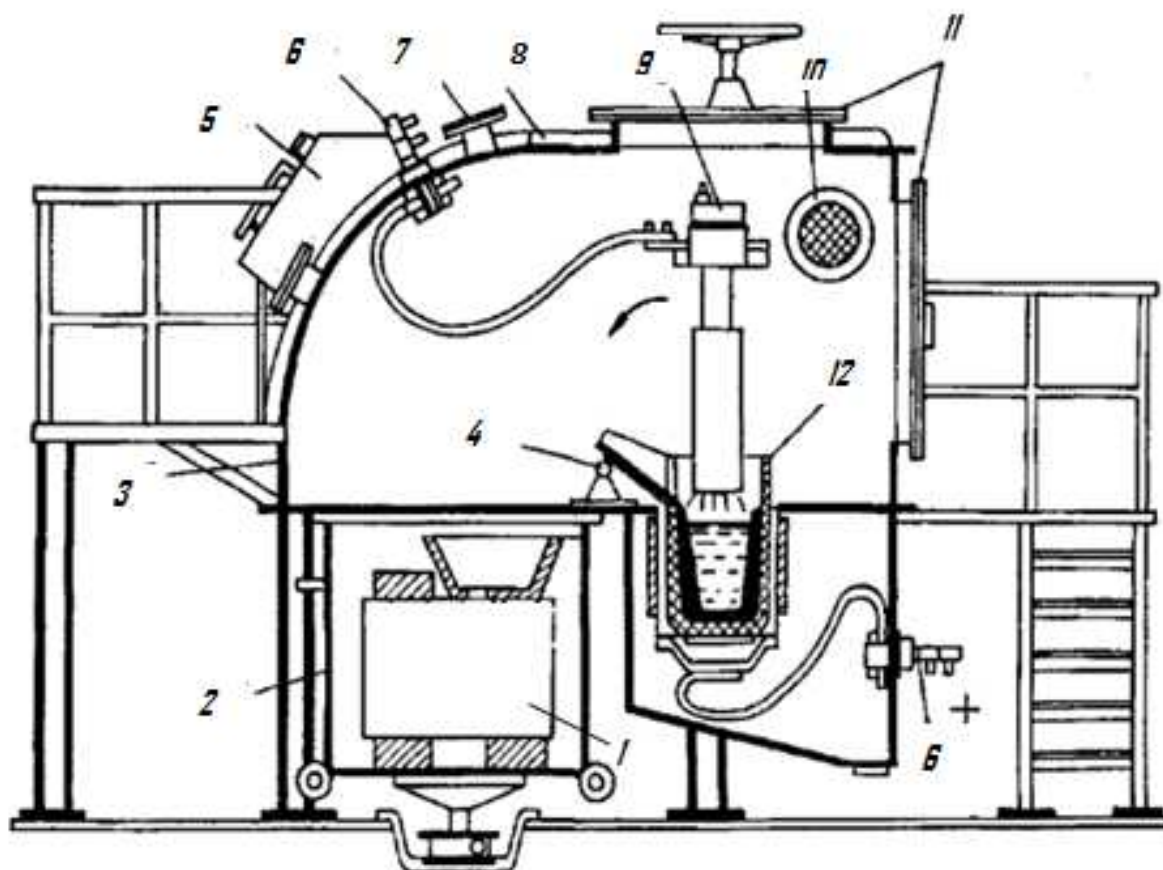


Рисунок 15 - Схема дуговой вакуумной гарнисажной печи «Нева-4»:

- 1 – форма 2 – заливочная камера; 3 – водоохлаждаемый корпус;
- 4 – механизм наклона тигля; 5 – пульт управления печи;
- 6 – водоохлаждаемые токопроводы; 7 – смотровое окно;
- 8 – рёбра жёсткости; 9 – механизм перемещения электрода;
- 10 – вакуумная система с насосами; 11 – люки для обслуживания внутренних узлов печи; 12 - водоохлаждаемый поворотный тигель.

Медный тигель (графитовой вставки) для плавки титановых сплавов, показан на рисунке 16.



Рисунок 16 – Медный тигель (графитовой вставки) для плавки титановых сплавов

Состояние плавильного тигля тщательно проверяется. Тигель подлежит замене в случае появления в нём трещин, чрезмерного утолщения или окисления гарнисажа. Разрушение графитовой вставки происходит в основном из-за небрежной загрузки расходных электродов в тигель, а также теплового воздействия при плавке и разливе металла. Новый графитовый тигель перед установкой в печь сушат в термостате или печах при температуре 200 – 250 °С в течение 8 – 10 ч. В корпус плавильного узла тигель устанавливают с зазором 3 – 6 мм на сторону, зазор плотно заполняют графитовой крошкой зернистостью 0,3 – 2,0 мм.

Металл гарнисажа по химическому составу должен соответствовать сплаву, который будет плавиться в тигле. Для наведения гарнисажа на дно тигля укладывают очищенные кусковые отходы соответствующего сплава, которые оплавляют расходным электродом. Через 20 – 30 мин в тигле производят плавку для наведения гарнисажа, металл которой сливают в изложницу. Намороженный на стенки и дно тигля металл образует равномерный первичный гарнисаж, толщиной примерно 15 мм, и плавный переход к донному гарнисажу. Нормальная толщина донного гарнисажа составляет для печи ОКБ-956 30-40 мм, печи ОКБ-935 – 30-60 мм, печи «Нева-4» – 60-90 мм.

Под влиянием следующих плавов происходит изменение формы гарнисажа за счёт увеличения толщины донной части (донная часть гарнисажа принимает вид конусообразной лунки). Последующие плавки приводят к равномерному нарастанию гарнисажа. При правильном соблюдении параметров плавки толщина донного гарнисажа за одну плавку увеличивается обычно на 10 – 15 мм. Таким образом, через 10 – 12 плавов

объём тигля уменьшается настолько, что возникает необходимость оплавления металла гарнисажа.

Слив металла в форму производится через графитовый носок тигля, имеющий форму усечённого конуса (рис.17).

Рекомендуемые размеры сливных носков тиглей для некоторых дуговых вакуумных гарнисажных печей показаны в табл. 8.

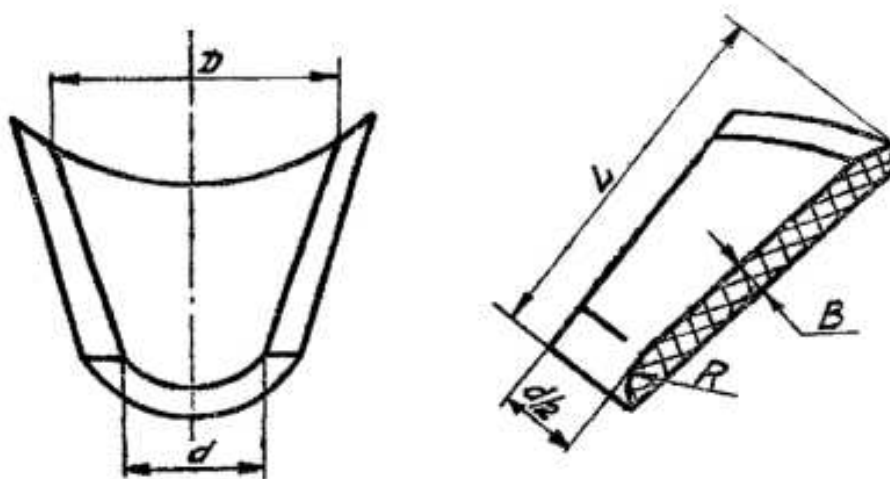


Рисунок 17 - Графитовый носок тигля для слива жидкого металла из печи

Таблица 8 - Рекомендуемые размеры сливных носков тиглей

Размеры, мм	Тип плавно-заливочной установки			
	ОКБ-956	«Нева-2»	ОКБ-935	«Нева-4», «Нева-5»
Расчётный проходной диаметр d_p	120	130	140	170
Диаметр с учётом толщины настыли d	150	160	175	220
Длина носка L	240	260	280	340
Диаметр носка D	240	260	280	340
Радиус в месте слива R	60	60	60	90
Толщина стенки носка B	40	40	40	60

После первой разливки жидкого металла на желобе носка образуется тонкая корка металла, которая прогрессивно увеличивающиеся при последующих сливах. Примерно через десять плавов носок полностью зарастает металлом и появляется необходимость его очистки.

Для выравнивания местных наплывов и чистки носка проводят вспомогательные плавки графитовыми электродами различной конфигурации (рис. 18). Оплавление донного гарнисажа тигля производится прямым графитовым электродом (рис. 18,а). Торцевой электрод имеет скруглённую форму, на другом торце сделана резьбовая нарезка для крепления его к траверсе. Если объём тигля после первого оплавления недостаточен, процесс повторяют до тех пор, пока этот объём не увеличится до заданной величины.

Очень часто гарнисаж тигля в верхней части имеет утолщение по всему периметру. Иногда это утолщение настолько велико, что расходимый электрод невозможно установить в тигель. В этом случае оплавление стенок гарнисажа производят фигурным графитовым электродом, имеющим форму гриба (рис. 18,б).

Между фигурным графитовым электродом и выступами гарнисажа зажигают дугу, которая расплавляет поясок гарнисажа. Жидкий металл стекает на дно тигля. Затем фигурный графитовый электрод опускают глубже в тигель и оплавляют все выступы гарнисажа. После операции оплавления бокового гарнисажа следует оплавить донный гарнисаж прямым графитовым электродом.

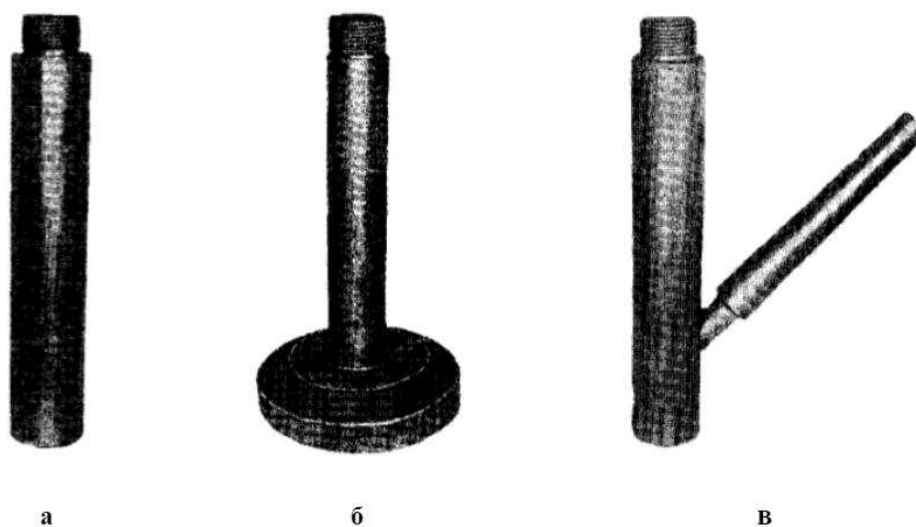


Рисунок 18 – Графитовые электроды различной конфигурации:
а – прямой электрод; *б* – электрод для оплавления стенок гарнисажа;
в – электрод для оплавления металла в заливочном носке

Оплавление металла, намерзшего на носок тигля, производят специальным графитовым электродом, имеющим наклонную цилиндрическую часть по форме носка (рис. 18,в). Тигель наклоняют в горизонтальное положение, на дно заливочной камеры устанавливают графитовую или стальную изложницу и зажигают дугу между электродом и настелью носка. Металл плавится и стекает в изложницу.

В тигель можно также устанавливать гарнисаж, заранее отлитый в специальную изложницу.

После проверки тигельного узла приступают к приварке расходуемого электрода. Приварку электрода к огарку производят следующим образом. Расходуемый электрод устанавливают в тигель вертикально. Во избежание переброса дуги на стенку бокового гарнисажа допускаемое отклонение от осевой линии тигля не должно быть больше 10 мм.

После включения питания печи огарок использованного электрода медленно опускают к верхнему торцу расходуемого электрода до возникновения дугового разряда.

Если электрод плохо приварен к огарку, то в процессе плавки он может оторваться и упасть в жидкую ванну. Далее в заливочную камеру печи устанавливают опоку (контейнер) с формами. Формы, заливаемые центробежным способом, центрируют относительно выпускного отверстия промежуточной воронки и закрепляют на столе центробежной установки. Печь герметизируют и производят её вакуумирование.

Плавление металла производят по режимам, установленным для конкретной печи. В таблице 9 приведен в качестве примера, режим плавки для печи «Нева-4».

Таблица 9 – Режим плавки на печи «Нева – 4»

При выплавке 150 – 250 кг жидкого металла				
Параметры дуги и соленоида	Время от начала плавки, мин			
	1 – 4	4 – 14	14 – 28	28 – до конца плавки
Сила тока дуги, кА	6 – 8	10 – 12	12 – 14	16 – 18
Напряжение дуги, В	31 – 33	33 – 34	34 – 36	36 – 39
Сила тока соленоида, А	-	7 – 8	7 – 8	7 – 8

При выплавке 250 – 500 кг жидкого металла				
Параметры дуги и соленоида	Время от начала плавки, мин			
	1 – 4	4 – 6	6 – 20	20 – до конца плавки
Сила тока дуги, кА	8 – 12	14 – 16	18 – 21	21 – 22
Напряжение дуги, В	32 – 33	33 – 34	35 – 36	37 – 39
Сила тока соленоида, А	-	7 – 8	7 – 8	8 – 9

При выплавке 500 – 800 кг жидкого металла				
Параметры дуги и соленоида	Время от начала плавки, мин			
	1 – 4	4 – 6	6 – 30	30 – до конца плавки
Сила тока дуги, кА	8 – 12	16 – 18	21 – 22	22 – 24
Напряжение дуги, В	32 – 33	33 – 34	36 – 38	38 – 40
Сила тока соленоида, А	-	7 – 8	7 – 8	8 – 9

Режимы плавки могут корректироваться в зависимости от состояния гарнисажа, диаметра расходуемого электрода, количества выплавленного металла и других факторов. В процессе плавки плавильщик следит (а при необходимости регулирует) по показаниям приборов за следующими параметрами работы печи:

- величиной силы тока и напряжения дуги;
- величиной силы тока соленоида;
- величиной разрежения в печи;
- температурой воды (охлаждение тигля);
- световой сигнализацией, характеризующей нормальную работу основных узлов печи.

Во время плавки необходимо тщательно следить за сохранностью бокового и донного гарнисажа, наблюдать за процессом горения дуги для предотвращения короткого замыкания и переброса дуги на стенки тигля. Если металл начинает размывать боковой гарнисаж, что определяется визуально или при помощи термопар, установленных в графитовой облицовке тигля, необходимо увеличить частоту переключений полярности тока соленоида и силу тока соленоида. Если этого недостаточно, следует уменьшить силу тока дуги. В случае переброса дуги на конструкцию узла тигля или корпус печи дугу необходимо погасить, а затем зажечь вновь. На рисунке 19 показан визуальный контроль над ходом плавки.



Рисунок 19 – Визуальный контроль над ходом плавки на печи «Нева-5»

Количество жидкого металла в тигле определяют визуально или по времени плавления. В настоящее время нет приборов, позволяющих точно определять объём жидкого металла перед сливом в форму, поэтому определение количества наплавленного металла в основном зависит от мастерства плавильщика. Ошибка в определении веса жидкого металла приводит либо к дефектам в отливках из-за неполного заполнения формы, либо к перерасходу металла.

Полезный выход жидкого металла при плавке в гарнисажном водоохлаждаемом тигле зависит от электрических параметров плавки: чем больше сила тока дуги, тем быстрее проводится плавка, и тем больше жидкого металла может быть получено в тигле. При недостаточной силе тока в результате плавки получится лишь небольшое количество жидкого металла, поскольку большая часть расплавляемого металла будет застывать на дне тигля. В модифицируемые сплавы за 1 – 2 мин до разливки с помощью специального устройства вводят модификатор (бор, карбид бора). Количество модификатора рассчитывается в зависимости от выплавляемой массы жидкого металла.

Перед заливкой металла в формы ток соленоида выключают. Металл из печи «Нева-4» разливают без отключения дуги. Для предотвращения погружения электрода в жидкий металл при повороте тигля его приподнимают. Перед сливом последних порций металла дугу гасят. По окончании заливки тигель медленно возвращают в вертикальное положение.

Заливку форм проводят, не прерывая струи жидкого металла. Продолжительность заливки зависит от массы заливаемого металла, преобладающей толщины стенки отливки, способа подвода металла в форму и т.д.

После заливки форм в течение 5 – 10 мин из печи откачивают газы, выделяющиеся из формы, затем перекрывают вакуумную систему и для ускорения охлаждения отливок и тигля в печь подают инертный газ (гелий или аргон) до давления 2 – 4 кПа.

После охлаждения отливок (в печи «Нева-4» в течение 2,0 – 3,0 ч) в печь вводят атмосферный воздух, раскрывают её, выгружают залитые формы и приступают к подготовке печи к следующей плавке. При длительном перерыве между плавками (более 8 ч) печь герметизируется и вакуумируется.

6 Формовочные смеси и связующие материалы

Литейные формы, изготовленные из обычно применяемых огнеупорных материалов, не могут быть применены для получения отливок из титана по отмеченным ранее причинам. Широкое применение получили графитовые формы. Их изготавливают из смесей, в состав которых входят в качестве основы графит, а в качестве связующего — смолы, пеки. Смеси уплотняют на встряхивающих или прессовых машинах под давлением 0,2—0,8 МПа. Изготовленные формы после выдержки на воздухе от 8 ч до 3 суток подвергают сушке при температуре 120°C и обжигу в восстановительной атмосфере при 700—980 °C в течение 1—24 ч. При этой температуре связующее коксуеться и из формы практически полностью удаляются все летучие вещества.

Применяются и оболочковые графитовые формы с фенолоформальдегидной смолой в качестве связующего. Мелкие сложные тонкостенные отливки из титановых сплавов получают в неразъемных формах, изготовленных по выплавляемым моделям. В состав суспензии входит высокодисперсный графитовый порошок и связующее на основе фенолоформальдегидных смол, в качестве обсыпчного материала — зернистый графит.

В настоящее время разрабатываются процессы изготовления форм на основе использования обычных огнеупорных материалов (Al_2O_3 , MgO) с применением защитных углеродных, карбидных и металлических покрытий, повышающих инертность форм к расплавленному титану и его сплавам.

В качестве материалов для форм при литье титана используются тугоплавкие окислы (магнезит, электрокорунд, двуокись циркония), графит, кокс или металлические материалы (преимущественно сталь). Связующим служат этилсиликат, жидкое стекло и размягченные смолы.

Для получения отливок сложной конфигурации, а также отливок, имеющих значительные габаритные размеры, используют формы, собранные из отдельных элементов (стержней). Стержни изготавливают преимущественно путем послойного уплотнения (набивки) формовочной смеси в металлических или деревянных ящиках. Наибольшая эффективность при изготовлении форм прессованием достигается при получении деталей отливок несложной конфигурации с отношением их высоты к максимальному размеру в поперечном направлении не более 0,8. Обычно такие отливки получают в двух полуформах с двумя (не более) стержнями.

Процесс изготовления форм прессованием имеет преимущества по сравнению с встряхиванием и ручной набивкой. Он позволяет повысить чистоту рабочей поверхности и увеличить прочность форм, что важно при центробежном способе литья отливок. Высокая производительность и достаточно хорошие санитарно-гигиенические условия труда - характерные особенности процесса.

Процесс изготовления уплотняемых формовочных смесей включает следующие операции:

- 1) приготовление порошка графита и его рассев на фракции;
- 2) приготовление связующего вещества и других вспомогательных материалов;
- 3) перемешивание графитового порошка в бегунах (смесителях) и введение связующего вещества;
- 4) контроль свойств смеси в сыром состоянии;
- 5) вылеживание смесей горячего отверждения (смеси холодного отверждения подаются после введения катализатора на формовку) [17].

Смеси горячего отверждения после приготовления направляются либо на формовку (с предварительным вылеживанием 1-3ч), либо в закрытый бункер, где они могут храниться в течение 1-3 суток. Формы и стержни, изготовленные из холоднотвердеющих смесей, после уплотнения выдерживают в оснастке до полного затвердевания (20-60 мин.), а затем извлекают. После отверждения, формы и стержни направляют на тепловую обработку: сушку и обжиг для полного удаления влаги и повышения прочности. Сушку и обжиг форм и стержней производят в электрических печах. Нагрев осуществляют по определенному режиму. После обжига формы и стержни охлаждают до 200°С вместе с печью, а затем на воздухе. После контроля собранную форму направляют на заливку.

Формовочные смеси, применяемые для изготовления разовых литейных форм, состоят из огнеупорной основы, связующего вещества и вспомогательных материалов. К огнеупорной основе формовочной смеси предъявляются следующие требования:

- высокая огнеупорность и химическая стойкость по отношению к жидкому титану;
- низкая испаряемость при нагреве в вакууме;
- минимальное изменение размеров форм в процессе обжига;
- стойкость к тепловому удару при заливке;
- высокая механическая прочность;
- безопасность для окружающей среды;
- доступность для промышленного использования;
- хорошая выбиваемость форм.

Поверхностные слои формы, контактирующие при заливке с металлом, нагреваются до температуры, равной температуре жидкого металла, заливаемого в форму. Вследствие этого температура плавления материала формы должна быть выше температуры заливаемого металла, т. е. формовочная смесь должна обладать высокой огнеупорностью. Стержневые смеси должны обладать ещё более высокой огнеупорностью, так как стержни окружены жидким металлом со всех сторон и прогреваются почти на всю толщину.

Наибольшей огнеупорностью и химической стойкостью по отношению к титану обладают формы на основе углеродных материалов. Они нашли широкое применение, как в отечественной, так и в зарубежной практике.

В связи с тем, что жидкий титан обладает высокой реакционной способностью и высокой температурой литья ($\approx 1850^{\circ}\text{C}$) к связующим материалам предъявляются следующие требования:

- огнеупорность и химическая инертность к жидкому титану;
- способность хорошо смачивать огнеупорную основу смеси;
- способность твердеть при тепловой или химической сушке;
- способность после высокотемпературного обжига форм сохранять прочную связь между частицами огнеупорной основы смеси;
- способность к незначительным объёмным изменениям в процессе высокотемпературного обжига;
- способность противостоять короблению форм.

Связующие вещества, применяемые в формовочных смесях для литья титановых отливок, разделяются на два класса: органические и неорганические.

6.1 Изготовление форм и стержней

Стержни применяют в основном для выполнения в отливках отверстий и полостей, а также наружных поверхностей отливок сложной конфигурации.

При заливке формы стержни обычно бывают со всех сторон окружены жидким металлом. Поэтому они должны обладать высокой газопроницаемостью, прочностью, податливостью, выбиваемостью, что обеспечивается выбором соответствующей стержневой смеси и конструкцией стержня.

Стержни делят на пять классов: по геометрическим размерам, конфигурации, условиям работы в литейной форме и требованиям к качеству литой поверхности.

I класс – стержни сложной конфигурации, ажурные, имеющие малые знаки, образующие в отливках необрабатываемые полости, к чистоте которых предъявляют высокие требования, например, стержни ленточного типа для отливок корпусов двигателей внутреннего сгорания.

II класс – стержни сложной конфигурации, имеющие наряду с массивными частями тонкие выступы, перемычки. Они образуют в отливке полностью или частично обрабатываемые поверхности.

III класс – стержни средней сложности, с массивными знаками, не имеющими особо тонких частей, но выполняющие в отливках полости, к чистоте поверхности которых, предъявляют повышенные требования.

IV класс – стержни простой конфигурации, образующие в отливках обрабатываемые и необрабатываемые поверхности, к чистоте которых, особых требований не предъявляется.

V класс – массивные стержни, образующие большие полости в крупных отливках.

Смесь для стержней I класса должна обладать высокой прочностью, поверхностной твердостью, высокой пластичностью во влажном состоянии, минимальной газотворностью, хорошей податливостью и выбиваемостью.

Смесь для стержней II класса должна удовлетворять тем же самым требованиям, но быть более прочной во влажном состоянии, чтобы массивные и высокие части стержня не разрушались под собственной массой.

Смесь для стержней III класса должна иметь высокую прочность во влажном состоянии, хорошую податливость и выбиваемость.

Смесь для стержней IV и V классов должны иметь высокую прочность во влажном состоянии, хорошую податливость и выбиваемость.

Стержни получают в ящиках вручную или на машинах с помощью тех же приемов, что и при формовке. Отделение литейного цеха, в котором изготавливают стержни, называют стержневым.

Изготовление графитовых форм.

Формы из графитовых порошков могут быть изготовлены послойной набивкой вручную, прессованием, методом затвердевающих на горячей модели оболочек, по выплавляемым моделям и т. д.

Для изготовления набивных графитовых форм по деревянным или металлическим моделям можно применять так называемую смесь Филда (смесь с водорастворимыми связующими веществами). Она состоит из 63% графитового порошка, 7% графитовой пыли, 5% злакового крахмала, 10% смолы или раствора каменноугольного пека в ацетоне (в соотношении 1:1), 8% древесного дёгтя и 7% воды. Графит и крахмал перемешивают в смесителе 2 мин, затем добавляют смолу, смесь перемешивают ещё 2 мин, вводят древесный дёготь и воду, после чего перемешивание ведут в течение 4 мин. Готовая смесь в сыром состоянии имеет газопроницаемость 190 единиц, прочность на сжатие 70 кПа ($0,7 \text{ кгс/см}^2$) влажность 6,9 %. После сушки прочность такой формовочной смеси на разрыв составляет 700 кПа (7 кгс/см^2).

Графитовые формовочные смеси с водорастворимыми связующими веществами находят ограниченное применение. По своим технологическим и эксплуатационным свойствам они существенно уступают графито-смоляным. Их основные недостатки: низкая пластичность, недостаточная прочность в сыром состоянии, большая усадка и др. Формы, изготовленные из этих смесей, обладают недостаточной термохимической стойкостью и вызывают повышенное загрязнение металла отливки примесями.

Более широкое применение в промышленности нашли графитовые формовочные смеси с органическими связующими (синтетическими смолами). Основное достоинство данных смесей – достаточно хорошие технологические свойства (прочность в сыром состоянии, текучесть, формуемость и т. д.). Но главное преимущество заключается в том, что формы, изготовленные из таких графитовых смесей, обладают высокой термохимической стойкостью и огнеупорностью.

В промышленности применяются различные по составу графитовые формовочные смеси, отличающиеся по гранулометрическому составу графитового порошка, типа и количества вводимого в смесь связующего вещества и т. д. Графитовые формовочные смеси для изготовления

уплотняемых форм классифицируют в зависимости от способа уплотнения и метода их отверждения. По способу уплотнения они подразделяются на смеси, уплотняемые прессованием (СФТ-1П, АТМ и др.), на формовочных встряхивающих машинах и вручную (СФТ-1, БГУ-1 и др.) и на универсальные (СГУ-1, СГУ-2, СГУ-3 и др.).

По методу отверждения графитовые формовочные смеси подразделяются на смеси холодного и горячего отверждения. К формовочным смесям холодного отверждения относятся: СГУ-1, СГУ-3, БГУ-1 и др., горячего отверждения – СГУ-2, СФТ-1, СФТ-1П, АТМ и др. В смесях первого типа отверждение происходит в результате полимеризации связующего вещества, вызванного введением в смесь катализатора. В смесях второго типа полимеризация связующего вещества осуществляется нагревом формовочной смеси.

Нагрев производят в нагревательных печах, куда загружаются изготовленные элементы литейной формы (смеси СФТ-1, СФТ-1П, СГУ-2 и др.) или в нагретой металлической оснастке в период прессования элементов литейной формы (смесь АТМ)

Процесс изготовления форм прессованием имеет преимущества по сравнению со встряхиванием и ручной набивкой. Он позволяет повысить чистоту рабочей поверхности и увеличить прочность форм, что важно при центробежном способе литья отливок. Графитовые формовочные смеси, применяемые для изготовления форм прессованием, содержат меньшее количество связующего вещества по сравнению с другими способами получения форм. Поэтому химическая инертность таких форм выше. Кроме того, эти формы претерпевают меньшие объемные изменения в процессе тепловой обработки, что повышает точность линейных размеров отливок. Технологический процесс изготовления графитовой формовочной смеси состоит из следующих основных этапов:

- приготовление порошка графита и его разделение на фракции;
- приготовление связующих материалов;
- перемешивание графитового порошка со связующим в смесителе;
- вылеживание смесей горячего отверждения (смеси холодного отверждения подаются на формовку после введения катализатора).

Перед приготовлением формовочной смеси графитовый порошок просушивают на металлических поддонах в электрических печах сопротивления. Температура сушки составляет не более 300°С, время сушки 2 – 3 ч. После просушивания порошок рассеивают на вибрационных установках и отбирают необходимое количество графитового порошка каждой фракции.

Технологический процесс изготовления форм из графитовых смесей состоит из следующих основных операций:

- приготовление формовочной смеси;
- изготовление полуформ и стержней одним из известных способов;

- выдержка на воздухе в течение ≈ 8 ч;
- сушка форм и стержней;
- высокотемпературный обжиг;
- сборка форм и подготовка их к заливке.

В процессе сушки форм и стержней содержащаяся в формовочной смеси влага и растворители смол (спирт, уайт-спирит и т.п.) удаляются, а также происходит полимеризация и твердение смол.

Сушка форм может проводиться по различным технологическим режимам, например: медленный нагрев со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в час до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$; и выдержка при этой температуре в течение 16 ч. Другой вариант сушки состоит в следующем: выдержка изготовленных форм на воздухе в течение 20 ч, медленный нагрев до $220 - 250^{\circ}\text{C}$, выдержка в печи при данной температуре в течение 2 ч, охлаждение форм вместе с печью до температуры $50 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выгрузка из печи.

Обжиг графитовых форм и стержней производится в контейнерах из жаростойкой стали в восстановительной атмосфере, создаваемой газами, выделяющимися при термодеструкции связующего вещества. Применяемые режимы обжига могут различаться между собой в зависимости от состава смеси и методов уплотнения и отверждения. Приблизённо технологию обжига можно представить так: нагрев формы осуществляется ступенчато - сначала до $450 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержка в течение 2 – 3 ч, а затем нагрев до $900 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержка в течение 3 – 4 ч; для предотвращения окисления графитовых форм и стержней при охлаждении после обжига и снижения их газотворности контейнеры с формами и стержнями удаляют из печей при температуре $850 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и охлаждают в дегазационных камерах, которые перед выгрузкой контейнеров с формами заполняют сухим аргоном; для повышения термохимической инертности форм обжиг можно проводить в вакуумных печах; после обжига полуформы и стержни обдувают сжатым воздухом и отправляют на сборку, собранные формы допускается хранить при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; далее формы помещаются в заливочную камеру плавильной установки, где они вакуумируются в течение ≈ 60 мин.

6.2 Сборка форм.

Сборка формы является ответственным процессом, требующим внимания и аккуратности. Сборка включает операции: подготовки полуформ и стержней, установки стержней (обычно в нижнюю полуформу), контроля положения стержней, накрытия нижней полуформы верхней, установки выпорных и литниковых чаш, скрепления полу форм или их нагружения.

Полуформы и стержни, поступившие на сборку, тщательно осматривают; к сборке не допускаются стержни и полуформы, имеющие какие-либо повреждения или дефекты. Перед сборкой формы продувают сжатым воздухом, для того чтобы удалить из нее частицы смеси или инородные тела.

Стержни устанавливают в форму в последовательности, указанной на сборочном чертеже или в технологической карте. При этом необходимо следить за тем, чтобы знаки стержней точно становились в отпечатки знаков модели. Если знак стержня почему-либо не подходит к своему гнезду в форме, то подгонка его опиливанием не допускается. Только в исключительных случаях, в условиях единичного или мелкосерийного производства, допускается подгонка знаков стержня, но специальным контрольным шаблонам. Положение каждого стержня относительно формы и других стержней проверяют контрольными шаблонами, а в поточно-массовом производстве - кондукторами.

Размеры тела отливки, образованные стержнями и формой или только стержнями, проверяют толщиномерами. В условиях единичного производства при сборке сложных форм используют контрольное перекрытие формы, если толщину тела отливки, образуемую формой и стержнями, нельзя проверить контрольным или измерительным инструментом. Перед контрольным перекрытием на поверхность формы или стержней в необходимых местах устанавливают куски глины "мушки". Затем делают контрольное перекрытие формы, в процессе которого куски глины сжимаются до толщины просвета между формой и стержнем, что должно соответствовать толщине тела отливки. После раскрытия формы "мушки" вынимают, измеряют их толщину и таким образом определяют возможную толщину стенки отливки.

Обычно стержни устанавливают в нижнюю полуформу на знаках, однако иногда, в условиях единичного производства, стержень крепят в верхней полуформе. Эта операция, должна быть выполнена, особенно тщательно, так как недостаточно надежное крепление стержня может привести к отрыву его от формы при сборке, поломке формы стержня, и даже к несчастным случаям.

В отдельных случаях для большей устойчивости стержня в форме при ее заливке металлом стержень устанавливают на жеребейки - жесткие металлические опоры. Высота жеребейки соответствует толщине тела отливки. Сплав для изготовления жеребейки обычно выбирают в соответствии с заливаемым в форму сплавом.

Поверхность жеребеек должна быть чистой, без следов ржавчины, влаги и масла. При подготовке жеребейки пескоструят, часто окрашивают алюминиевой краской, иногда лудят. Чистые жеребейки хорошо свариваются с основным металлом отливки и не вызывают образования раковин или других несплошностей. Однако для отливок, работающих под давлением жидкости или газа, применять жеребейки нежелательно, а иногда недопустимо.

7 Разработка технологии производства отливок из сплава ВТЗ-1Л

Химический состав (в %) материала ВТЗ-1Л

Fe	C	Si	Cr	Mo	W	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
0.2 - 0.7	до 0.15	0.15 - 0.4	0.8 - 2.3	2 - 3	до 0.2	до 0.05	85.205 - 91.55	5.3 - 7	до 0.5	до 0.18	до 0.015	прочих 0.3

Механические свойства при T=20°C материала ВТЗ-1Л

Сортамент	Размер	Напр.	s_b	s_T	d_5	γ	КСУ	Термообработка
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	-
			990		4		300	

Физические свойства материала ВТЗ-1Л

T	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$	λ	ρ	C	$R \cdot 10^{-9}$
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.14					

Отливки из сплава ВТЗ-1Л используются:

- нефте - газодобыче и транспортировке (бурильные перфораторы, трубы);
- химической, пищевой промышленности (насосы, центрифуги, сепараторы, цистерны);
- авиастроение — составляющие корпуса, крыльев, приводы, несущие винты летательных аппаратов;
- судостроение — обшивка бортов, винты, детали устройств;
- ракетостроение, космическая техника — основные конструктивные элементы, части приборов [18].

7.1 Характеристика отливки представителя

В данной выпускной работе рассмотрена отливка – обратный клапан, из сплава ВТЗ-1Л, представленная на рис. 20.

Титановые клапаны используются в системах водоснабжения и отопления, энергосистемах, нефте- и газопроводах. Титановые клапаны для использования в энергетических системах рассчитаны на более высокие давления, чем в обычных трубопроводах.

Тип присоединения и материал прокладки выбирают в зависимости от условий работы клапана: давления, рабочей температуры и коррозионных свойств среды.

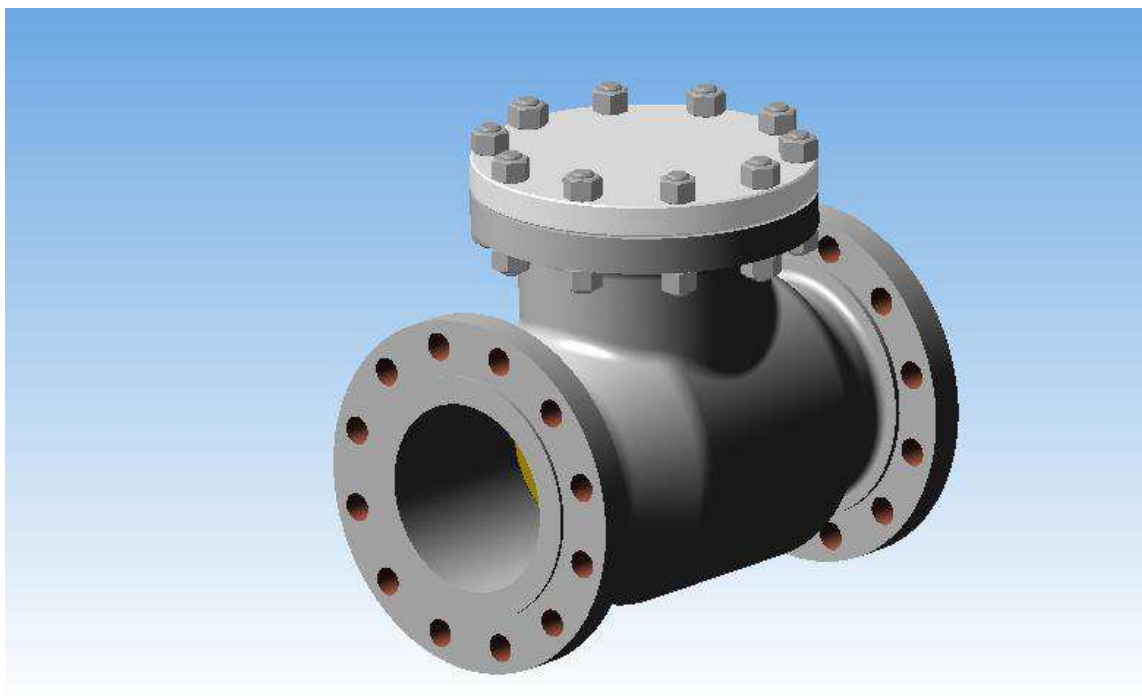


Рисунок 20 – Корпус обратного клапана из сплава ВТЗ-1Л

Титановые клапаны для подачи агрессивных жидкостей под давлением 2 кгс/мм^2 работают более 1700 ч, в то время как подобные клапаны из коррозионно-стойкой стали требуют замены через каждые 70 ч работы. На поверхности титана не образуется накипь. Поэтому использование теплообменников из титана целесообразно, несмотря на низкую теплопроводность последнего. Благодаря высокой коррозионной стойкости в морской воде титан и его сплавы применяют в судостроении. На титан и его сплавы не налипают ракушки [19].

Титановая арматура стоит дороже, чем арматура из нержавеющей стали, однако применение ее в большинстве случаев экономически оправдано. В некоторых агрессивных средах, где нестойки нержавеющие стали, медь и бронза, вентили, эмалированные с фторопластовой диафрагмой, выходят из строя через 16 ч, а титановые вентили бесперебойно работают в течение нескольких лет.

Титан обладает высокой стойкостью против коррозии и эрозии в контакте с никелевыми и кобальтовыми шламами при высоких температурах и давлениях. По этой величине титан широко применяется для изготовления гидрометаллургической аппаратуры никелево-кобальтовых заводов.

Срок службы арматуры общепромышленного назначения на предприятиях, изготавливающих хлор, как правило, составляет 0,5 - 1 год, что вследствие необходимости замены арматуры или, ее ремонта нарушает ритмичность производства и непрерывность осуществления технологических

процессов. Учитывая это обстоятельство, на таких средах, как влажный хлор-газ, рассол, целесообразно применять титановую арматуру.

Несмотря на то, что стоимость титановой арматуры в несколько раз выше стоимости гуммированной, экономически целесообразно применять более дорогую титановую арматуру.

Так, стоимость титанового вентиля Ду 150 мм составляет 10 тыс. руб., а стоимость ремонта гуммированного вентиля - 1 тыс. руб.; следовательно, затраты на титановый вентиль окупятся в течение одного года.

Габаритные размеры корпуса обратного клапана, в разрезе представлены на рисунке 21.

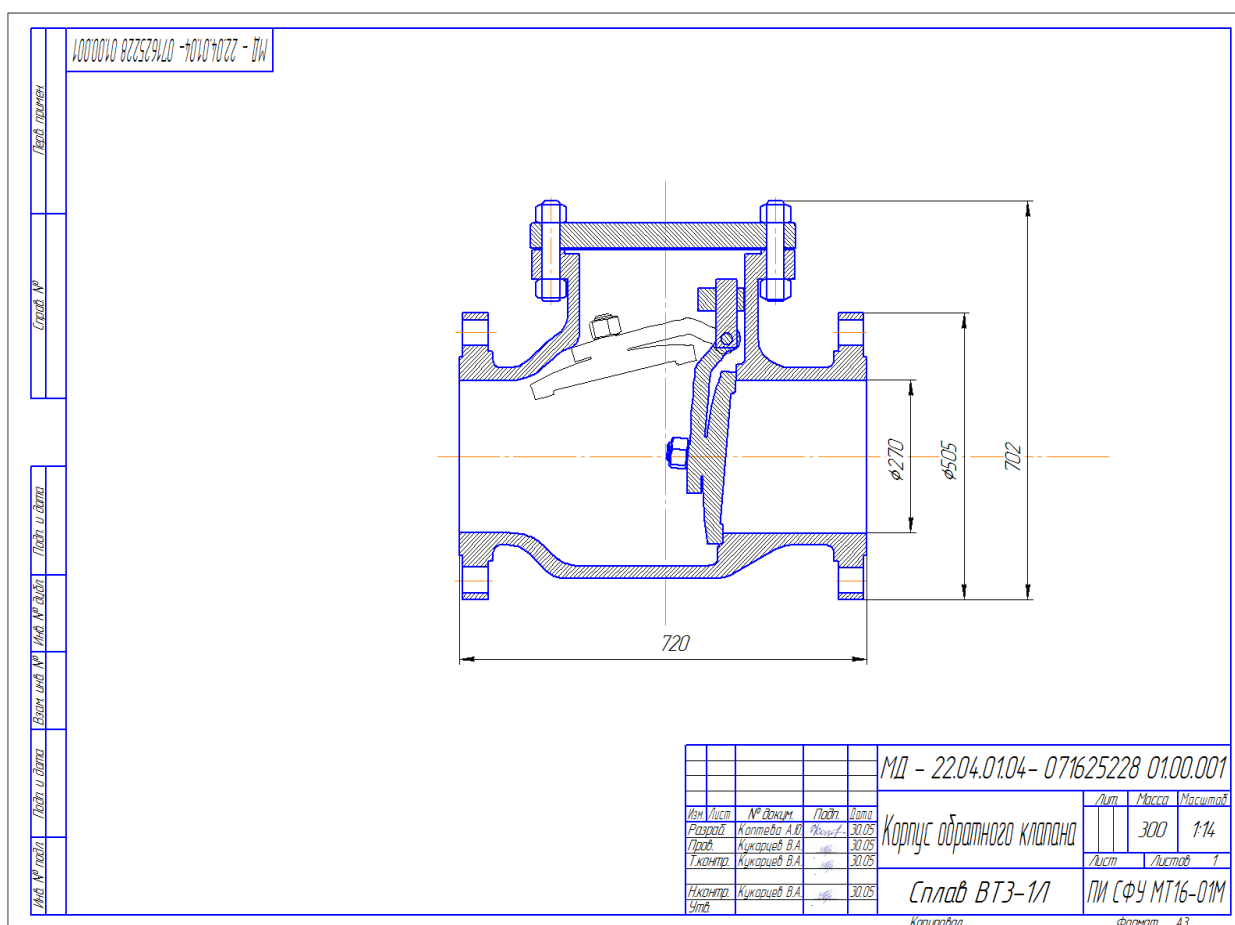


Рисунок 21 – Габаритные размеры корпуса обратного клапана, в разрезе из сплава ВТЗ-1Л

7.2 Конструирование литниково-питающей системы с применением программ моделирования

При расчёте площадей элементов литниково-питающей системы необходимо учитывать образование настывов на стенках формы, уменьшающих их фактическое сечение (табл. 10).

Таблица 10 - Толщина настыли в элементах литниково-питающей системы

Элементы литниковой системы	Тип плавильно-заливочного агрегата	
	ОКБ-956, «Нева-2», ОКБ-935	«Нева-4», «Нева-5»
	Толщина настыли на сторону, мм	
Носок тигля:		
после первого слива	4 – 6	5 – 7
после второго слива	8 – 12	12 – 16
после третьего слива	12 – 18	20 – 26
Литниковая втулка	5 – 7	7 – 10
Стояк и литниковые ходы	3 – 5	5 – 7

Схема типовой литниково-питающей системы для стационарной заливки показана на рис. 22. При стационарной заливке металл из плавильного тигля поступает в литниковую воронку (заливочный желоб), затем через литниковую втулку (насадку) в литниковую чашу, далее в стояк, литниковые ходы, питатели и в полость формы.

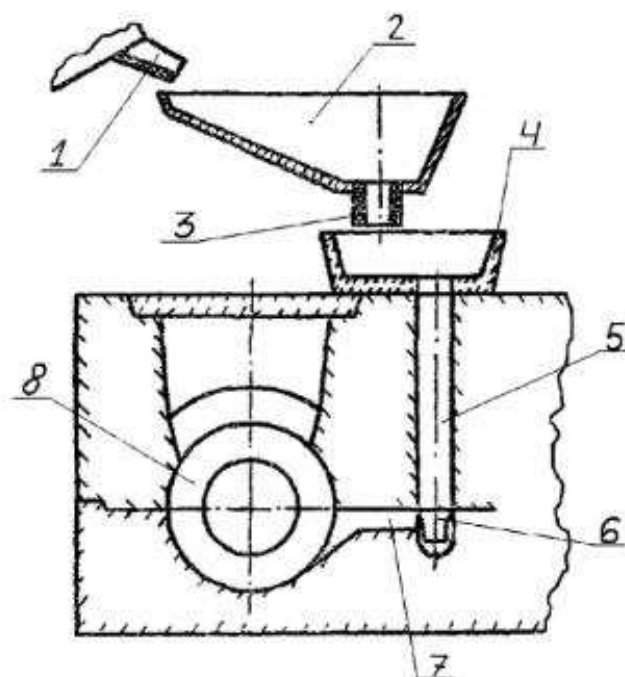


Рисунок 22 - Типовая схема литниковой системы для стационарной заливки титановых сплавов: 1 – сливной носок тигля; 2 – заливочный желоб; 3 – литниковая втулка; 4 – литниковая чаша; 5 – стояк; 6 – литниковый ход; 7 – питатель; 8 – полость формы

В зависимости от принятой технологии изготовления отливки отдельные элементы литниковой системы могут быть исключены, например,

литниковая воронка при стационарной заливке или литниковые ходы при щелевых питателях.

Литниковая воронка (заливочный желоб) изготавливается из титановых сплавов или нержавеющей стали марки 12Х18Н9ТЛ методом литья, или из листа посредством сварки.

Литниковая втулка изготавливается из графита (предпочтительно марки ГМЗ).

Стационарная заливка форм может производиться по следующим основным схемам:

- заливка одной формы через литниковую чашу;
- заливка нескольких форм одновременно через центральный стояк;
- заливка формы непосредственно через литниковую чашу без литниковой воронки.

Литниковая чаша изготавливается по процессу аналогичному изготовлению форм. Объем чаши рекомендуется принимать равным 30 – 40% от объема заливаемого металла.

Конфигурация и размеры литниковых чаш устанавливаются в зависимости от типа плавильно-заливочного агрегата и размеров заливаемых форм при разработке технологического процесса.

Стояк для стационарной заливки рекомендуется применять круглого сечения с необходимым литейным уклоном. В нижней части стояка должен быть предусмотрен зумпф для создания «подушки» жидкого металла, гасящей энергию падающей струи. При заливке крупных отливок на дно зумпфа устанавливают графитовую пластину или стакан. Сопряжение элементов литниково-питающей системы должно быть плавным с радиусом перехода не менее 0,5 диаметра литникового хода.

Для улавливания первых порций поступающего в форму металла, содержащих повышенное количество включений (газовых и неметаллических) и имеющих пониженную температуру, в конце литниковых ходов предусматривают тупиковые отводы, длина которых принимается равной или большей диаметра литникового хода.

Расчёт литниково-питающей системы выполнен исходя из следующих условий: масса отливки корпуса обратного клапана (с учётом припусков, для отливок, изготавливаемых в уплотняемых формах по ГОСТ Р 53464-2009) – 300 кг.

Число отливок в форме – 1.

Преобладающая толщина стенки отливки – 20мм.

Расчет элементов литниково-питающей системы при стационарной заливке производится по пособию Титова А.В. Производство отливок из титановых сплавов, 2015г., в следующем порядке:

1. Определяется оптимальная продолжительность заливки формы в зависимости от преобладающей толщины стенки отливки по формуле

$$\tau_{\text{зал}} = \mu \tau_0 (1 + n), \quad (1)$$

где τ_0 - продолжительность заполнения формы без учёта прибылей, определяемая по эмпирической формуле

$$\tau_0 = 0,273(1,15\delta + 0,25) \quad (2)$$

δ - преобладающая толщина стенок отливки, мм; μ - коэффициент гидравлических потерь (в большинстве случаев принимается равным 0,8);
 n - коэффициент заполнения прибылей и литниково-питающей системы.

$$\tau_0 = 0,273(1,15 * 20 + 0,25) = 6,3 \text{ с}$$

Коэффициент n рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{100}{K} - 1, \quad (3)$$

где K - выход годного %.

$$K = \frac{300}{750} * 100 = 40\%$$

$$n = \frac{100}{40} - 1 = 1,5$$

$$\tau_{\text{зал}} = 0,8 * 6,3 (1 + 1,5) = 12,6 \text{ с}$$

2. Определяется весовая скорость заливки по формуле

$$G = \frac{M_{\text{ж}}}{\tau_{\text{зал}}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{ж}}$ - масса жидкого металла на форму, кг.

$$G = \frac{750}{12,6} = 59,52 \text{ кг/сек}$$

3. Определяется площадь поперечного сечения втулки в литниковой чаше (в зависимости от принятой схемы заливки) по формуле

$$F = \frac{G * 10^3}{\mu \rho \sqrt{2gH}}, \quad (5)$$

где μ - коэффициент расхода, равный 0,97; H - напор жидкого металла в заливочном желобе.

Вычисляем площадь поперечного сечения литниковой втулки (напор принимаем равным 500мм)

$$F = \frac{59,5 \cdot 10^3}{0,97 \cdot 7,48 \sqrt{2 \cdot 980 \cdot 50}} = 43,74 \text{ см}^2$$

4. По формуле (6) определяются значения площадей поперечных сечений остальных элементов литниково-питающей системы. Для стационарной заливки форм рекомендуются следующие соотношения площадей сечений элементов литниково-питающей системы:

$$\sum F_{\text{пит}} : F_{\text{л.х}} : F_c = 1 : 1,2 : 0,95, \quad (6)$$

где $F_{\text{пит}}$, $F_{\text{л.х}}$, F_c - суммарные площади поперечных сечений литниковой чаши.

$$F_{\text{л.ч.}} = 0,95 \cdot F_0 = 41,5 \text{ см}^2$$

$$F_{\text{ст.}} = 0,95 \cdot F_0 = 41,5 \text{ см}^2$$

$$\sum F_{\text{л.х}} = 1,2 \sum F_0 = 1,2 \cdot 43,74 = 52,48 \text{ см}^2$$

$$\sum F_{\text{п}} = 1,2 \sum F_0 = 1,2 \cdot 43,74 = 52,48 \text{ см}^2$$

$D_{\text{л.ч.}}$ и $D_{\text{ст.}}$ равны. Определим радиус стояка по площади.

$$R = \sqrt{\frac{F_{\text{ст}}}{\pi \cdot 2}} = \sqrt{\frac{41,5}{3,14 \cdot 2}} = 7,27 \text{ см}$$

Так как общее сечение трех питателей для отливки составляет:

$$\sum F_{\text{п}} = 52,48 \text{ см}^2,$$

узнаем сечение для одного питателя $F_{\text{п}} = \frac{\sum F_{\text{пит}}}{3} = 17,49 \text{ см}^2$

Далее найдем радиус питателя по площади:

$$R = \sqrt{\frac{F_{\text{п}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{17,49}{3,14}} = \sqrt{5,57} = 2,36 \text{ см}$$

Получив радиус, определим диаметр

$$D = R \cdot 2 = 2,36 \cdot 2 = 4,72 \text{ см}$$

Общее сечение литникового хода для отливки составляет:

$$\sum F_{\text{л.х.}} = 52,48 \text{ см}^2, \text{ следовательно, } F_{\text{л.х.}} = \frac{\sum F_{\text{л.х.}}}{2} = 26,24 \text{ см}^2$$

Далее определим радиус:

$$R = \sqrt{\frac{F_{\text{л.х.}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{26,24}{3,14}} = \sqrt{8,35} = 2,82 \text{ см}$$

Получив радиус, определим диаметр

$$D = R \cdot 2 = 2,82 \cdot 2 = 5,64 \text{ см}$$

Окончательно имеем:

$$F_{\text{пит}} = 4,72 \text{ см}^2, F_{\text{л.х.}} = 5,64 \text{ см}^2, F_{\text{с}} = 41,5 \text{ см}^2.$$

Готовая литниковая система для данной отливки представлена на рис.23.

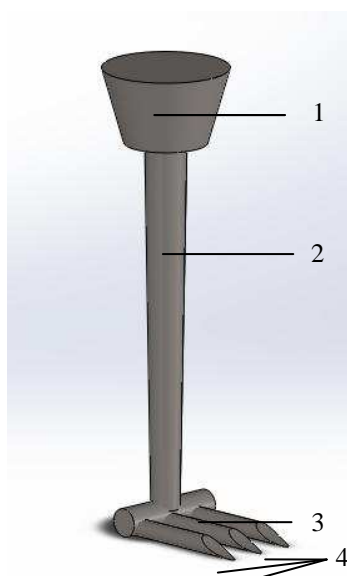


Рисунок 23 – Литниково-питающая система
1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – литниковый ход; 4 – питатели

Расчет прибылей.

Основным назначением прибылей является питание термических узлов и стенок отливок, а также направленное удаление газов из форм и жидкого металла в процессе их заливки и затвердевания. При разработке технологического процесса и размещения прибылей должны быть предусмотрены все меры для обеспечения свободного выхода газов и направленного всплытия газовых включений в прибыль, так как удаление газов из титановых сплавов через поры формы затруднено вследствие быстрого образования корки затвердевшего металла.

Для питания отливок из титановых сплавов рекомендуется устанавливать прибыли следующих типов:

- верхние (закрытые и открытые);
- боковые (отводные);
- горизонтально-цилиндрические;
- полушаровые.

Для прибылей, устанавливаемых на фланцах, рекомендуются следующие размеры:

- ширина прибыли «В» – 0,4 - 0,8 от диаметра питаемого фланца;
- толщина прибыли «Т» – 1,2 - 1,5 от толщины фланца (в зоне сопряжения с фланцем);
- высота прибыли – 0,4 - 0,8 от диаметра фланца, но не менее 1,2 от толщины фланца (меньшие значения ширины и высоты прибылей относятся к отливкам, заливаемым центробежным способом);
- уклон для прибылей высотой до 150 мм – до 10°, для прибылей высотой больше 150 мм – 6 - 7°.

Исходя из этого, определяем размеры прибыли:

Диаметр боковых узлов отливки – 500 мм;

Ширина прибыли $500 \cdot 0,8 = 400$ мм;

Толщина прибыли (у основания) $52 \cdot 1,2 = 62,4$ мм;

Высота прибыли $500 \cdot 0,6 = 300$ мм;

Масса прибыли была определена в программе Solid Works по выбранным размерам, и вес ее составил 78,28 кг;

Диаметр средней части отливки – 414 мм;

Ширина прибыли $414 \cdot 0,5 = 207$ мм;

Толщина прибыли $414 \cdot 1,2 = 496,8$ мм;

Высота прибыли $414 \cdot 0,6 = 248,4$ мм

Масса была определена в программе Solid Works по выбранным размерам, и вес ее составил 114,73 кг;

Масса литниково-питающей системы 50,43 кг;

Металлоемкость отливки составляет:

$$G = G_{\text{п}} + G_{\text{л}} + G_{\text{о}}$$

$$G = 78,28 \cdot 3 + 114,73 + 300 + 50,43 = 700 \text{ кг}$$

Технологический выход годного:

$$K = \frac{G_0}{G} * 100 = \frac{300}{700} * 100 = 42,75\%$$

Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в Solid Works, представлена на рисунке 24.

Для определения правильности разработанной литниково-питающей системы применим программу моделирования LVMFlowCV.

Применение LVMFlowCV позволяет:

- оптимизировать режимы заливки сплава и затвердевания отливки;
- оптимизировать литниковую систему.
- анализировать процессы литья при использовании различных материалов (углеродистые стали; легированные стали; чугуны серые, белые, ковкие и высокопрочные; алюминиевые, титановые, бронзовые, магниевые сплавы, а также сплавы на никелевой и медной основе и др.)

Также LVMFlowCV существенно ускоряет исследовательскую работу по проектированию отливок, обеспечивая хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

Анализ технологического процесса изготовления отливок в системе компьютерного моделирования литейных процессов LVMFlowCV состоит из следующих приемов и этапов:

1. Конвертация геометрии отливки в формат LVMFlowCV.
2. Создание расчетной конечно-объемной сетки.
3. Задание свойств материалов.
4. Задание предельных условий.
5. Проведение расчета температурных полей.
6. Контроль изменений расчетных параметров.
7. Расчет напряжений и деформаций в отливке.

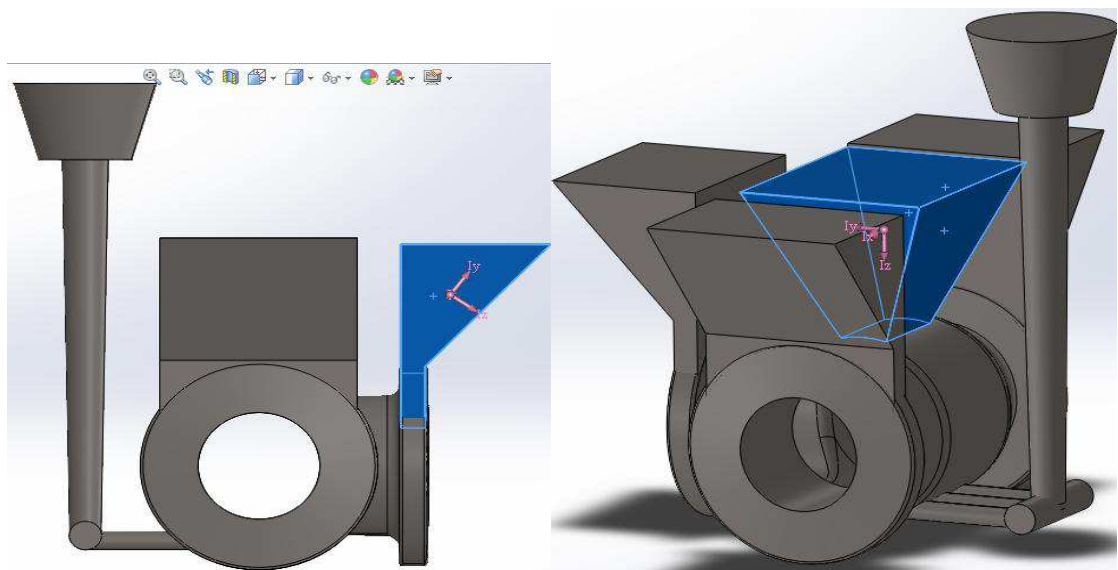


Рисунок 24 - Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в Solid Works

Рисунок 25 – Чертеж отливки, с элементами литниково-питающей системы.



Компьютерное моделирование разрешает проследить все процессы, которые происходят в металле при заполнении формы, затвердевании и возникновении усадочных дефектов.

В LVMFlowCV есть три расчетных модуля: «Кристаллизация», «Моделирование течения расплава», «Полная задача».

В модуле «Кристаллизация» форма сначала считается мгновенно заполненной расплавом и моделируется процесс затвердевания сплава. В основе модели лежит неравновесная теория кристаллизации многокомпонентного сплава.

В модуле «Моделирование течения расплава» моделируется заполнение формы расплавом, которое рассматривается как течение идеальной жидкости без учета процессов теплопередачи.

Одновременное моделирование процессов заполнения формы расплавом и его затвердевания осуществляется в модуле «Полная задача».

По механизму образования выделяют два типа усадочных дефектов:

- 1) раковины (макропористость);
- 2) микропористость.

Макропористость образуется при недостатке питания выше зеркала расплава, когда отсутствует необходимый его объем для компенсации усадки. Для прогнозирования макропористости моделируется возникновение и движение зеркала расплава. Перемещение зеркала обусловлено объемной усадкой, а его возникновение происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов расплава.

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала в области теоретически достаточного питания. Падение давления в глубине зоны с формально хорошими условиями питания происходит по следующим причинам: большая объемная усадка, затрудненное движение жидкого металла в твердожидкой зоне, изоляция от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления.

Для выполнения этапа предварительного моделирования в программе SolidWorks было создано несколько вариантов отливок, чтобы на стадии моделирования проверить, какой из вариантов (размещения отливок в форме, технологических факторов) является наиболее подходящим [20].

Результаты моделирования (рис. 26) показывают, в каких местах возможно образование дефектов усадочного характера.

По данному изображению можно провести анализ дефектов в отливке. Имеется виды отливки сбоку, сверху, спереди и в изометрии. Все виды имеют рентгеновскую прозрачность, и все дефекты проецируются на данный вид. Исходя из этого, можно сделать анализ, что отливка является негодной, так как содержание дефектов достаточно велико. Необходимо проводить новое исследование.

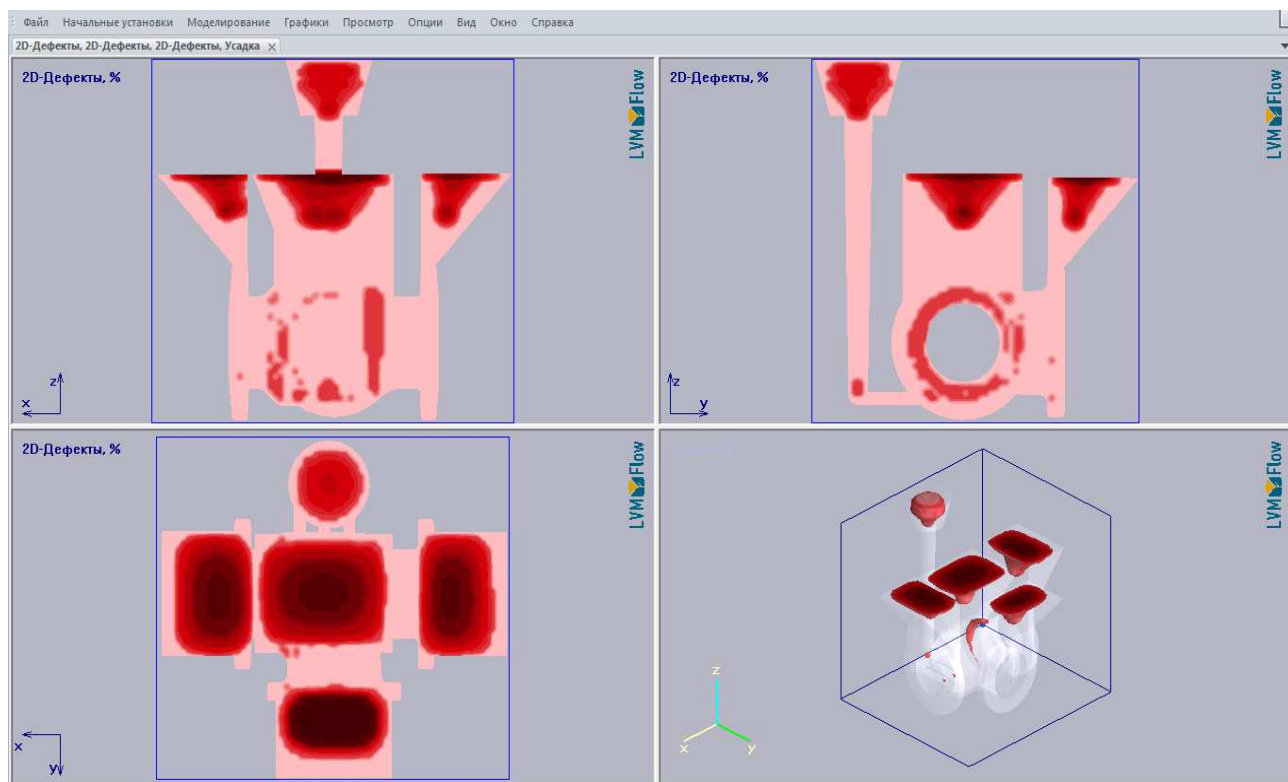


Рисунок 26 – Результат моделирования разработанной литниково-питающей системы

Исходя из этого, определяем новые размеры прибыли:

Диаметр боковых узлов отливки – 500 мм;

Ширина прибыли $500 \cdot 0,8 = 400$ мм;

Толщина прибыли (у основания) $52 \cdot 1,2 = 62,4$ мм;

Высота прибыли $500 \cdot 0,6 = 300$ мм;

Масса прибыли была построена в программе Solid Works по выбранным размерам, и вес ее составил 85,91 кг;

Диаметр средней части отливки – 414 мм;

Ширина прибыли $414 \cdot 0,5 = 207$ мм;

Толщина прибыли $414 \cdot 1,2 = 496,8$ мм;

Высота прибыли $414 \cdot 0,6 = 248,4$ мм

Масса была построена в программе Solid Works по выбранным размерам, и вес ее составил 116,43 кг;

Масса литниково-питающей системы 75,43 кг;

Металлоемкость отливки составляет:

$$G = G_{\text{п}} + G_{\text{л}} + G_{\text{о}}$$

$$G = 85,91 \cdot 3 + 116,43 + 300 + 75,43 = 749,6 \approx 750 \text{ кг}$$

Технологический выход годного:

$$K = \frac{G_0}{G} \cdot 100 = \frac{300}{750} \cdot 100 = 40 \%$$

Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в Solid Works, представлена на рисунке 27

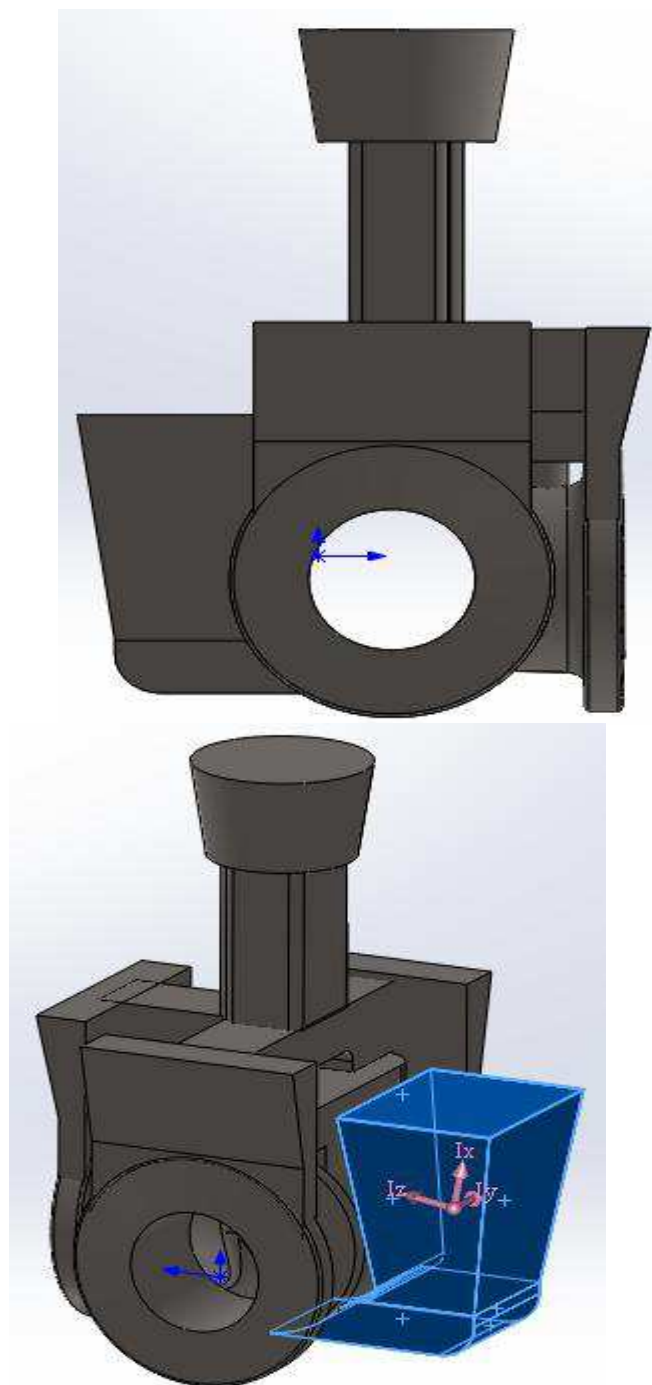


Рисунок 27 - Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в Solid Works

Рисунок 28 – Чертеж отливки, с элементами литниково-питающей системы.



Проведя операции заливка и охлаждение, мы получили результаты, которые показаны на рис. 29.

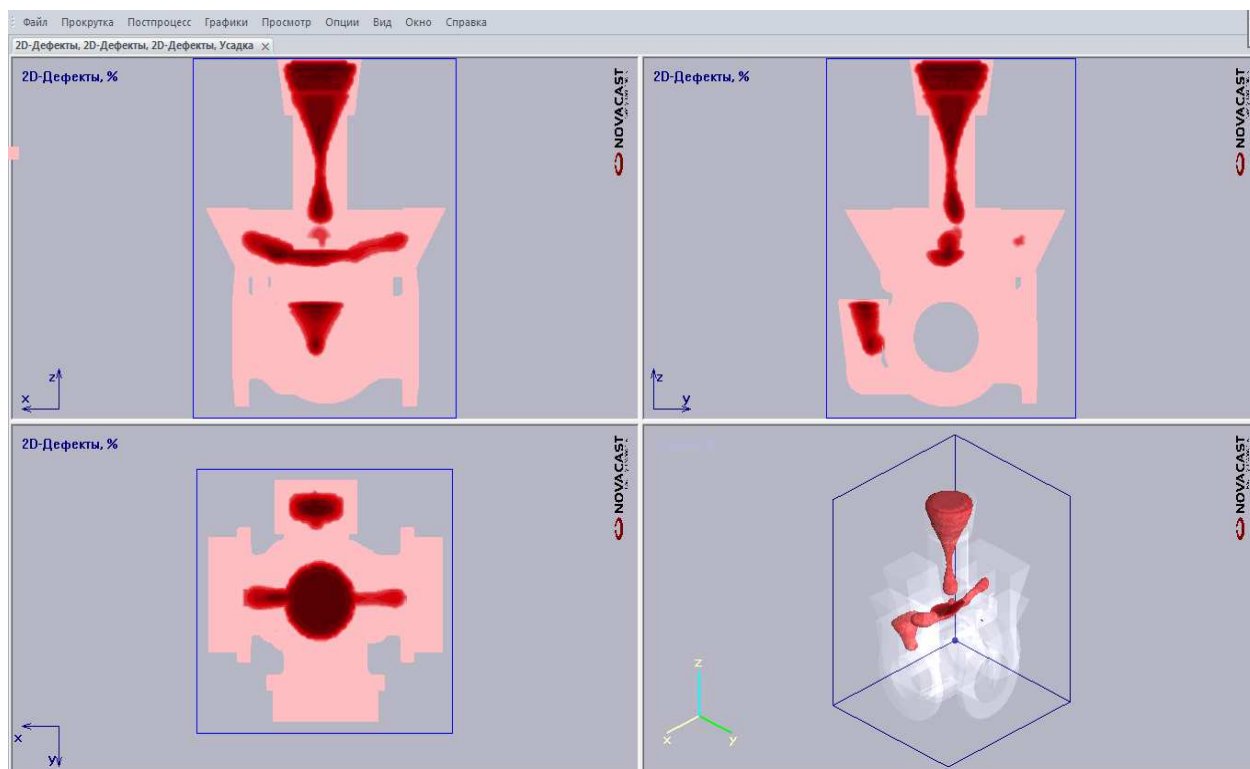


Рисунок 29 – Итоговый результат моделирования

Образование дефектов незначительное, заполнение формы проходит плавно, и кристаллизация проходит в необходимый момент времени, то есть не получается недолива и большинство усадочных дефектов уходит в прибыль. Как видно из рисунка, в отливке еще имеются дефекты, но их величина незначительна, и они попадают в припуск на механическую обработку (при обработке дефекты не будут обнаружены). Полученный результат можно использовать для изготовления оснастки и подбора технологического оборудования.

8. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок.

Мною разработана схема технологического процесса для изготовления отливок «Корпус обратного клапана», рисунок 30.



Рисунок 30 – Схема технологического процесса изготовления отливок «Корпус обратного клапана»

Исходя из полученной металлоёмкости и характеристик плавильных печей, выбираем вакуумно-дуговую печь «Нева-5», представленную на рис.31.



Рисунок 31 – Вакуумно-дуговая печь «Нева-5»

Выбор этой печи обуславливается тем, что только она обладает достаточной ёмкостью тигля. Технические характеристики печи «Нева-5», представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Технические характеристики печи «Нева-5»

Наименование параметра	Единица измерения	Допустимое значение
Устанавливаемая мощность (номинальная)	кВт	3200
Мощность вспомогательного оборудования	кВт	400
Максимальная масса двух плавильных ванн по сливу	кг	3000 (2*1500)
Максимальная длина электрода	мм	1800
Максимальный диаметр электрода	мм	690
Максимальная масса электрода	кг	1500
Остаточное давление в холодной печи без форм	Па	0,67
Размер заливочной камеры: <ul style="list-style-type: none"> • Диаметр • Высота 	мм	3000 2000
Частота вращения стола центробежной машины	об/мин	50-150
Масса печи	т	100

Смеситель литейный чашечный катковый периодического действия, представлен на рисунке 32. Смеситель предназначен для приготовления формовочной смеси по ПГС процессу. Принцип действия смесителя основан на перемещении вертикальных катков по слою смеси и перемешивания ее вращающимися плужками. Данный тип смесителя позволяет добиться однородной смеси без комков. Цикл перемешивания составляет 5-10 минут.



Рисунок 32 – Смеситель литейный чашечный катковый.

Для изготовления отливок из сплава на основе титана марки ВТЗ-1Л выбран способ литья в графитовые формы. Выбор основан на опыте фирмы ATI Wah Chang, an Allegheny Technologies Company Albany, OR, которая рекомендует при металлоёмкости 1300 фунтов и более применять именно такой способ изготовления форм [23].

Для обжига готовых форм применяется контейнер, представленный на рисунке 33

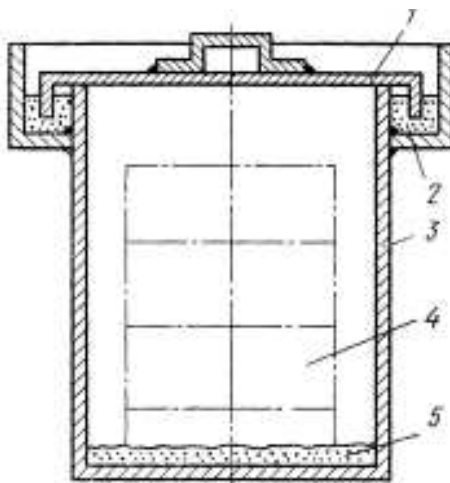


Рисунок 33 – Контейнер для обжига графитовых форм:

1 – крышка контейнера; 2 – песчаный затвор; 3 – контейнер; 4 – формы; 5 – графитовая засыпка

Выбивные решетки предназначены для выбивки отливок из форм после заливки и выдержки с последующим разрушением форм. На рисунке 34 представлена вибрационная выбивная решетка.

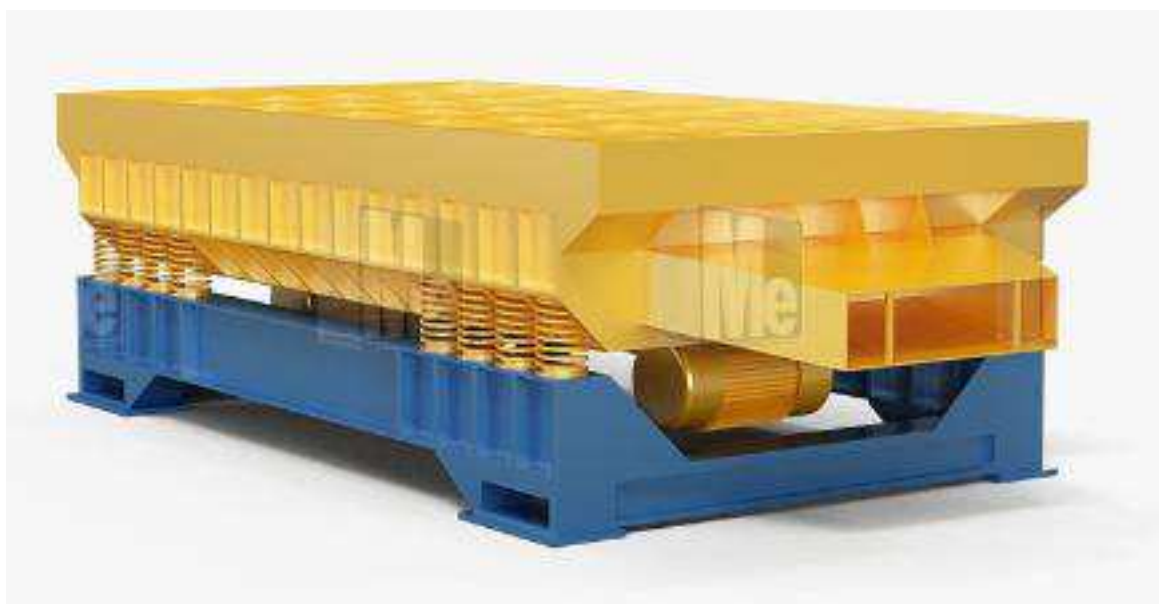


Рисунок 34 – Вибрационная выбивная решетка

Обрезка прибылей и элементов литниково-питающей системы производится газовыми резаками, что приводит к изменению структуры металла в месте реза. Для выравнивания структуры применяется отжиг отливок в термических печах, таких как СДО. На рисунке 35, представлена печь СДО для термообработки отливок.

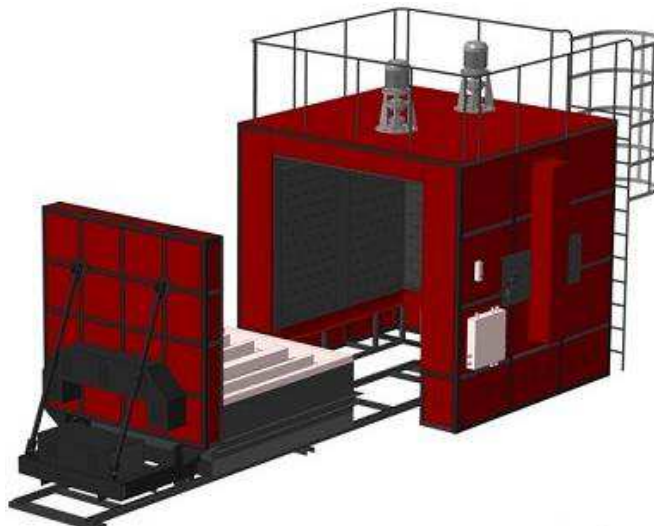


Рисунок 35 - Печь СДО для термообработки отливок

Основными операциями очистки отливок являются: очистка их поверхностей от пригоревшей формовочной и стержневой смеси; удаление элементов литниково-питающей системы, в том числе и прибылей; удаление заливов; обрубка и зачистка. На рис. 36 представлена камера очистная дробеметная периодического действия



Рисунок 36 - Камера очистная дробеметная периодического действия

Компьютерное моделирование процесса кристаллизации отливки «Корпус обратного клапана» с применением САМ ЛП позволило:

- выявить места появления и процесс образования дефектов;
- отследить в реальном времени изменение температурно-фазовых полей процесса кристаллизации;
- сформировать рекомендации по оптимизации ЛПС;
- получить данные по распределению потока жидкого металла и движению шлаковых частиц в отливке.

Таким образом, была обеспечена возможность в кратчайшие сроки провести оптимизацию литниково-питающей системы без проведения доработки модельной оснастки, заливки и механической обработки детали, а продолжительность процесса разработки технологии получения годных отливок, с выбором необходимого технологического оборудования, сократить в 6–10 раз.

В ходе работы были изучены свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью, а так же особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения. Произведен расчет литниковой-питающей системы, который был проверен с использованием программы LWMFlowCV, определен выход годного и, исходя из этого сделан выбор плавильной печи и технологического оборудования. Произведен расчет расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава ВТЗ-1Л.

Использование программы LVMFlowCV позволяет технолог-литейщику визуализировать процессы, происходящие при формировании отливки, оперативно вносить изменения в технологию, оптимизировать литниково-питающую систему и обеспечить получение отливки необходимого качества, позволяющего достаточно продолжительное время эксплуатировать вентили в условиях агрессивных сред и высоких давлений [21].

9 Расчёт норм расхода основных материалов

Рассмотрим титановый сплав ВТЗ-1Л, ГОСТ.19807-91. Для того чтобы произвести расчеты, необходимо установить исходные данные. Исходные данные представлены в таблице 12.

Все расчеты производились в программе Microsoft Excel 2010.

Таблица 12 – Исходные данные для расчета металлозавалки

Данные	%	кг
Выход годного	40	1000
Брак	5	125
Угар	0,5	12,5
Литники и прибыли	52,5	1312,5
Безвозвратные потери	1	25
Сливы и скрап	1	25
Итого:	100	2500

Для начала, нам необходимо произвести расчет шихты для расходуемого электрода, таблица 13.

Таблица 13 – Расчет шихты для расходуемого электрода.

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %	Хим состав в %											
		Ti		Al		Si		Cr		Fe		Mo	
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте
ТГ100 (титан)	88,62	99,90	88,53			0,01	0,01			0,06	0,05		
АД000	6,28	0,02	0,00	99,68	6,26	0,15	0,01			0,15	0,01		
МЧ	2,59					0,01	0,00			0,01	0,00	99,98	2,59
х99	1,43			0,50	0,01	0,20	0,00	99,00	1,42	0,50	0,01		
ФС20	0,80			1,00	0,01	21,00	0,17	0,80	0,01	77,20	0,62		
Итого	99,72		88,53		6,28		0,19		1,42		0,69		2,59

Первые плавки проводятся без возврата, так как его нужно накопить, поэтому следующий расчет шихты на свежих материалах и расходуемом электроде, таблица 14.

Таблица 14 – Расчет шихты на свежих материалах и расходуемом электроде.

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %	Хим состав в %											
		Ti		Al		Si		Cr		Fe		Mo	
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте
ТГ100 (титан)	57,60	99,90	57,54			0,01	0,01			0,06	0,03		
АД000	4,09	0,02	0,00	99,68	4,08	0,15	0,01			0,15	0,01		
МЧ	1,68					0,01	0,00			0,01	0,00	99,98	1,68
х99	0,93			0,50	0,00	0,20	0,00	99,00	0,92	0,50	0,00		
ФС20	0,52			1,00	0,01	21,00	0,11	0,80	0,00	77,20	0,40		
Электрод	35,00	88,53	30,99	6,28	2,20	0,19	0,07	1,42	0,50	0,69	0,24	2,59	0,91
Итого	99,82		88,53		6,28		0,19		1,42		0,69		2,59

После того как возврат накопился, работаем по основной Расчет шихты на электроде, возврате и ломе, таблица 15.

Таблица 15 – Расчет шихты на расходуемом электроде, возврате и ломе.

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %	Хим состав в %											
		Ti		Al		Si		Cr		Fe		Mo	
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте
Электрод	35,00	88,53	30,99	6,28	2,20	0,19	0,07	1,40	0,49	0,69	0,24	2,59	0,91
Возврат	59,00	88,53	52,23	6,28	3,71	0,19	0,11	1,40	0,83	0,69	0,41	2,59	1,53
Отходы (темплеты)	6,00	88,53	5,31	6,28	0,38	0,19	0,01	1,40	0,08	0,69	0,04	2,59	0,16
Итого	100,00		88,53		6,28		0,19		1,40		0,69		2,59

Определение нормы расхода материалов.

Таблица 16 – Нормы расхода для расходуемого электрода

Наименование и марка	ГОСТ, ТУ	Норма расходов	
		%	кг/т
ТГ100 (титан)	ГОСТ 17746-96	88,62	2215,50
АД000	ГОСТ 4784-97	6,28	157,00
МЧ	ГОСТ 25442-82	2,59	64,75
Х99	ГОСТ 5905-2004	1,43	35,75
ФС20	ГОСТ 1415-93	0,80	20,00
Итого		99,72	2493,00

Таблица 17 – Нормы расхода для варианта - шихты на свежих материалах и расходуемом электроде

Наименование и марка	ГОСТ, ТУ	Норма расходов	
		%	кг/т
Электрод		35,00	875,00
ТГ100 (титан)	ГОСТ 17746-96	57,60	1440,00
АД000	ГОСТ 4784-97	4,09	102,25
МЧ	ГОСТ 25442-82	1,68	42,00
Х99	ГОСТ 5905-2004	0,93	23,25
ФС20	ГОСТ 1415-93	0,52	13,00
Итого		99,82	2495,50

Таблица 18 – Нормы расхода для варианта - шихты на электроде, возврате и ломе

Наименование и марка	Норма расходов	
	%	кг/т
Электрод	35,00	875,00
Возврат	59	1475,00
Отходы	6	150,00
Итого	100,00	2500,00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был произведен расчет литниково-питающей системы, а также, используя программу LWMFlowCV, проведены изменения, устраняющие дефекты в отливке, определен выход годного, и исходя из этого, произведен выбор плавильной печи. Также, определен метод изготовления формы, выбрана смесь для изготовления формы, оборудование для сушки прокали, произведен расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава ВТЗ-1Л.

Прежде, чем получить удовлетворительный результат, было проведено 6 исследований, с учётом изменения следующих параметров: температура заливки, время заполнения формы, время кристаллизации, материал формы, начальная температура формы, материал стержня.

Таким образом, все выбранные параметры, характеристики и конфигурации позволили получить необходимый результат. Наблюдение за развитием процессов и четкое хронометрирование образования дефектов в программе LVMFlowCV дает возможность понять, когда и в какой области дефекты могут возникнуть, что в свою очередь, позволяет, непосредственно, в процессе разработки вносить изменения в конструкцию литниковой системы.

Завершающим этапом данной работы является расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава ВТЗ-1Л.

Выполненная работа соответствует требованиям технического задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Характеристика титановых сплавов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studwood.ru>.
2. Сплавы на основе титана [Электронный ресурс] Справочная система «Студопедия» – Режим доступа: <https://studopedia.ru>.
3. Классификация титана и его сплавов [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://prod.bobrodobro.ru>.
4. Титан и его сплавы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.studsell.com>.
5. Файловый архив студентов «Studfiles» 8.1.3 Титан и его сплавы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfiles.net>.
6. Пат.2363775 Российская Федерация - Способ получения покрытий на изделиях, выполненных из титана и его сплавов //Ковалева М. Г., Колобов Ю.Р., Сирота В.В., Храмов Г.В. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный университет",2008
7. Металлургическая торговая площадка / Титан и его сплавы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.1metal.ru>.
8. Высокопрочные титановые сплавы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://titan-splav.3dn.ru>.
9. Корпорация ВСМПО АВИСМА/Строительство [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vsmppo.ru>.
10. Титов. А.В. Производство отливок из титановых сплавов: учебное пособие / Титов. А.В - Нижний Новгород, 2015
11. С.Г. Глазунов, К.К.Ясинский Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности: учебное пособие / С.Г. Глазунов, К.К.Ясинский - ВИАМ 1993
12. А. Г. Илларионов, А. А. Попов ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов - Екатеринбург Издательство Уральского университета, 2014
13. Справочник по цветным металлам Титановые литейные сплавы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://libmetal.ru>.
14. Интернет-помощник Общие сведения о литейных титановых сплавах [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://helpiks.org>.
15. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>.
16. Электрометаллургия Конструкция печей вакуумно-дугового переплава [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://metallurgy.zp.ua>.
17. Справочник Область применения титановых сплавов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://topuch.ru>.
18. «ПКФ ПТЭР» Клапаны. Каталог с техническими характеристиками [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.1057567.ru>.

19. НПЦ Титан Применение титана [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://npctitan.ru>.
20. Комарь С.А. Разработка технологии изготовления литейной формы с помощью специализированных САПР: дис. Шамина О.Б. доцент, ктн 15.04.01 / Комарь Сергей Андреевич. – Томск, 2016.
21. Савельев Ю. CAD Master Машиностроение Литье по выплавляемым моделям: взгляд изнутри / Савельев Ю. – 4 изд., 2004 – с. 1-6
22. Переоснастка Обработка дерева и металла сплавов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://pereosnastka.ru>
23. Ammtiac Quarterly, Vol. 2, N. 1, Casting titanium in Rammed Graphite Molds / techsolutios: Precious Metals 2007 – с. 1-6

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический Институт

Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Темных В. И.

подпись инициалы, фамилия

«22» июня 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной
прочностью на основе титана

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный руководитель

Кукарцев
подпись, дата

проф. каф. МТОИ
к. т. н.
должность, ученая степень

В.А. Кукарцев

инициалы, фамилия

Выпускник

Коптева
подпись, дата

А.Ю. Коптева

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Мусохранов
должность, ученая степень

М.Ю. Мусохранов

инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Материаловедения и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.И. Темных
подпись инициалы, фамилия
«21» июня 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студент Коптева Алена Юрьевна

Группа МТ16-01М Направление (специальность) 22.04.01.04

«Синтез и литье новых металлических материалов»

Тема выпускной квалификационной работы:

«Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана»

Утверждена приказом по университету № 16290/с от 22.11.16

Руководитель ВКР В.А. Кукарцев канд.техн.наук, профессор кафедры МиТОМ

Исходные данные для ВКР:

- разработать технологию производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана с использованием программы моделирования LWMFlowCV;
- изучить свойства титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью и особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения;
- произвести выбор основного необходимого технологического оборудования

Перечень разделов ВКР

1. Характеристика титановых сплавов. Общие сведения
2. Классификация используемых титановых сплавов их применение
3. Литейные свойства сплавов на основе титана
4. Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки сплавов на основе титана
5. Плавка металла и заливка форм
6. Формовочные смеси и связующие материалы
7. Разработка технологии производства отливок из сплава ВТЗ-1Л
8. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок
9. Расчёт норм расхода основных материалов

Перечень графического материала:

- чертежи деталей;
- сборочные чертежи;
- блок-схема технологического процесса

Руководитель ВКР

В.А. Кукарцев

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению



подпись, инициалы и фамилия студента



подпись

А.Ю. Коптева

« ____ » _____ 2018 г.